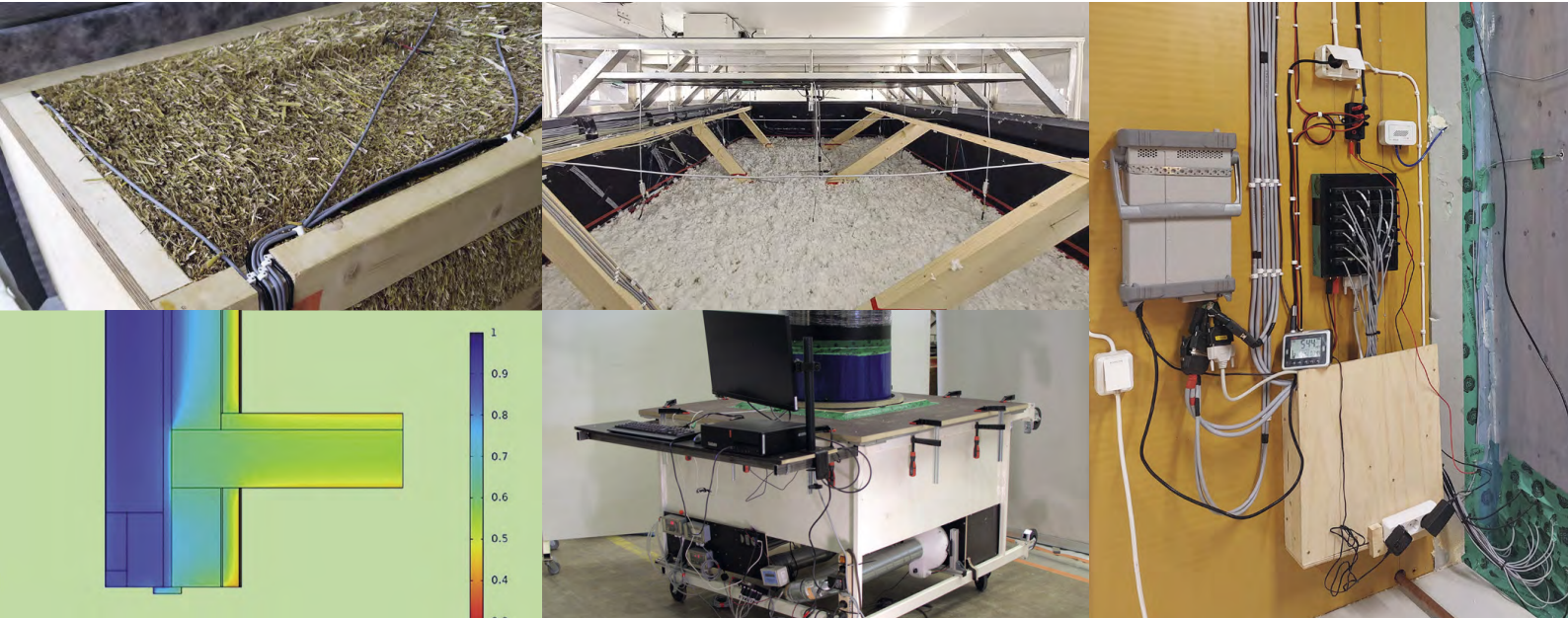


RAKENNUSFYYSIIKKA 2023

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

Osa 2



RAKENNUSFYSIKKA 2023

Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut

24.– 26.10.2023, Tampere

Osa 2

Toimittajat Juha Vinha & Tuomas Raunima

Painopaikka:
Grano Oy
2023

ISBN 978-952-03-3120-7

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. Voittajaehdokkaana 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, Tärinäneristys
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

B1. Uudet ohjeet

RIL 225-2023 – Uusi ohje rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskentaan

Pekka Talaskivi¹, Antti Souto², Asso Erävuoma³, Tapio Kilpeläinen⁴, Pasi Käkälä⁵, Tuuli Kunnas⁶, Tuomo Ojanen⁷, Pasi Typpö⁸, Juha Vinha⁹ ja Tero Virrantuomi¹⁰

¹ RIL ry

² A-Insinöörit Suunnittelu Oy

³ Finnfoam Oy

⁴ Jackon Finland Oy

⁵ Kingspan Insulation Oy

⁶ Rakennustuoteteollisuus RTT ry

⁷ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

⁸ Termex-Eriste Oy

⁹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

¹⁰ Paroc Group Oy

Tiivistelmä

Uudessa julkaisussa RIL 225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta ohjeistetaan miten rakennusmateriaalien, -tarvikkeiden ja -tuotteiden lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo määritetään ja miten rakenteiden lämmönläpäisykertoimen laskenta tapahtuu eurooppalaisten standardien mukaisesti. Ohje korvaa edellisen, vuonna 2004 ilmestyneen kansallisia määrittelytapoja ja laskentamenetelmiä esittäneen painoksen. Ohjeessa esitetään myös standardeista puuttuvia ja niitä täydentäviä Suomen oloihin tarkoitettuja ohjeita. Nämä liittyvät mm. lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutuksen huomioon ottamiseen sekä kylmien lämmöneristysten, kuten routaeristysten, lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvon määrittämiseen. Lisäksi julkaisuun on sisällytetty kattavasti esimerkkilaskelmia, jotka helpottavat perehtymään laskentamenetelmiin ja eri rakenteiden U-arvon laskentaan liittyviin yksityiskohtiin.

1. Johdanto

Ohje perustuu kolmen eurooppalaisen standardin sisältöön:

- SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009 [1] määrittelee menetelmät lämpöteknisesti homogeenisten rakennusaineiden ja -tuotteiden ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnittelu-arvon määrittämiseksi.
- SFS-EN ISO 6946:2017 [2] soveltuu rakenne- ja rakennusosien lämmönvastuksen ja lämmönläpäisykertoimen laskemiseen. Standardia ei voi soveltaa oviin, ikkunoihin ja muihin lasitettuihin osiin, julkisivujärjestelmään eikä rakenneosiin, joihin liittyy lämmön siirtyminen maahan ja rakenneosiin, joiden läpi ilman on suunniteltu kulkevan.
- SFS-EN ISO 13370:2017 [3] soveltuu rakennuksen maanpäällisten ulkoseinien tason alapuolella olevien rakennusosien ominaislämpöhäviökerrointen ja lämpövirtojen laskemiseen. Näitä ovat maanvaraiset lattiat, ryömintätalaiset alapohjat, lämmittämättömät kellarikerrokset, jotka ovat sisäpuolen lattiapinnan tasolla tai sen alapuolella sekä lämmitetyt kellarikerrokset, jotka ovat maanpinnan tasolla tai sen alapuolella.

2. Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo

Tuotestandardeissa esitetään lämmöneristeiden eurooppalaisen teknisen hyväksynnän pelisäännöt, joiden noudattaminen on CE-merkinnän edellytys. Ellei lämmöneristeelle ole

olemassa soveltuva tuotestandardia, voidaan eristeelle saada eurooppalainen tekninen hyväksyntä (ETA) ja oikeus CE-merkintään noudattaen hyväksynnässä määriteltyä menettelyä. Lämmönläpäisykertoimen laskemisen kannalta on olennaista, että tuotteiden valmistajalta edellytetään kaikkien olennaisten ominaisuustietojen ilmoittamista.

2.1 Lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo ja suunnitteluarvo

Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo λ_D (Lambda declared) on valmistajan ilmoittama arvo, joka perustuu CE-merkintään (harmonisoitu tuotestandardi tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän eli ETA:n perusteella) tai kolmannen osapuolen antamaan sertifikaattiin. Ilmoitettua arvoa käytetään suunnitteluarvon määrittämisen lähtötietona. Suunnittelijan edellytetään itsenäisesti määrittelevän λ_U -arvojen määrittämisen lähtötiedot.

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ_U (eli design arvo, jota aikaisemmin on merkitty λ_d) määritetään standardissa SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009 [1] esitetyllä tavalla seuraavasti:

$$\lambda_U = \lambda_D \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_a \quad (1)$$

missä F_T = lämpötilan poikkeamisen huomioon ottava muuntokerroin
 F_M = kosteuspitoisuuden poikkeamisen huomioon ottava muuntokerroin
 F_a = lämmönjohtavuuden vanhenemismuutoksen huomioon ottava muuntokerroin

Mikäli lämpötilan, kosteuspitoisuuden tai vanhenemisen huomioon ottavia muuntokertoimia ei ole tarpeen käyttää, lämmöneristevalmistajan CE-merkitty (tai muuten ilmoittama) ilmoitettu lämmönjohtavuuden arvo λ_D on sama kuin suunnitteluarvo.

Joillekin uusille materiaaleille ei kuitenkaan juuri ole ilmoitettuja arvoja käytettävissä, jolloin SFS-EN ISO 10456 [1] taulukoituja arvoja voi käyttää suoraan suunnitteluarvoina.

2.2 Lämpötilan muuntotekijä

Mikäli lämmönjohtavuuden ilmoitettua arvoa T_1 ei ole määritetty 10 °C keskilämpötilassa, tulee lämmönjohtavuuden arvo korjata vastaamaan suunnittelulämpötilaa (10 °C). Lämpötilan muuntotekijä määritetään seuraavasti:

$$F_T = e^{f_T (T_2 - T_1)} \quad (2)$$

missä f_T = lämpötilan muuntokerroin
 T_1 = keskilämpötila, jota sovelletaan ilmoitettuun lämmönjohtavuuteen
 T_2 = lämmöneristyksen suunnittelulämpötila

Myös käytettäessä lämmöneristeen suunnittelulämpötilana T_2 muuta kuin suositeltavaa 10 °C arvoa (esim. $T_2 = 0$ °C, jäädytetty tila), tulee lämmönjohtavuuden arvo korjata käyttäen muuntokerrointa. Asia tulee esittää laskelmissa ja suunnitteluasiakirjoissa selkeästi.

Taulukko 1. Esimerkki lämpötilan muuntotekijästä laskettuna mineraalivillalle.

Lämmöneriste-materiaali	Ilmoitettu lämmönjohtavuus λ_D (W/mK)	λ_D :n mukainen lämpötilaolosuhde T_1 (°C)	Suunnittelu-lämpötila T_2 (°C)	Lämpötilan muuntokerroin f_T (1/K)	Lämpötilan muuntotekijä F_T (-)
Mineraalivilla (pehmeä levyvilla) (puhalluseriste)	0,036 0,041	10 °C	0 °C	0,0048	0,9531

Taulukoituja arvoja on lisää ohjeessa ja SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009 Liitteessä A. [1]

2.3 Kosteuspitoisuuden muuntotekijä

Mikäli lämmöneristys suunnitellaan käytettäväksi rakenteessa eri kosteuspitoisuudessa, missä ilmoitettu lämmönjohtavuuden arvo on määritetty ($u_{23,50} = 23 \text{ °C}$, 50 % RH), tai ilmoitetun lämmönjohtavuuden arvo muuttuu suunnittelukosteuden vaihteluvälillä, lämmönjohtavuuden arvo tulee korjata vastaamaan suunnittelukosteutta (50 % RH). Kosteuden muuntotekijä määritetään kosteuspitoisuuden kaavalla 3 seuraavasti:

$$F_m = e f_u (u_2 - u_1) \quad (3)$$

missä f_u = kosteuden muuntokerroin, kosteuspitoisuus ilmoitettu paino-osuutena, kg/kg
 u_1 = eristeen kosteuspitoisuus, määritettäessä ilmoitettu lämmönjohtavuus, kg/kg
 u_2 = eristeen suunnittelukosteus, kg/kg

Taulukoituja arvoja on lisää standardin SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009 taulukossa 4. [1]

2.4 Vanhenemisen muuntotekijä

SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009 [1] ei esitetä lukuarvoja lämmönjohtavuuden vanhenemisen muuntotekijälle F_a . Vanheneminen on lähes poikkeuksetta otettu huomioon määritettäessä lämmöneristeiden ilmoitettua lämpöteknistä arvoa.

2.5 Olemassa olevien rakenteiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot

Aikaisemmin käytettyjen lämmöneristeiden ja rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuden arvoja ei ole taulukoitu EN-standardeissa eikä niiden arvoina voida käyttää uusien vastaaventyyppisten lämmöneristysmateriaalien arvoja.

Taulukoituja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja löytyy RIL 225-2023 ohjeen liitteestä 1.

3. Lämmönvastuksen laskenta

3.1 Lämmönvastus

Homogeenisen rakennekerroksen lämmönvastus lasketaan seuraavasti:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4)$$

missä d = materiaalikerroksen paksuus rakenneosassa
 λ = materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

Taulukko 2. Rakenneosan sisä- ja ulkopuolen tyypilliset pintavastukset.

Pintavastus (m ² K/W)	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
Sisäpuolen pintavastus R_{si}	0,10	0,13	0,17
Ulkopuolen pintavastus R_{se}	0,04	0,04	0,04

Rakennekerroksen lämmönvastuksen määrittäminen tapahtuu SFS-EN ISO 6946:2017 [2] mukaan samalla periaatteella rakennusosan sijainnista riippumatta siitä (esim. ulkoilmaan rajoittuva tai maanvastainen). Pintavastukset huomioidaan ilman kanssa kosketuksissa oleville pinnoille. Maanvastaisen alapohjan ulkopuolista pintavastusta ei siten huomioida.

Lämmönvastuksen määrittämisessä huomioidaan myös ilmakerrokset, jotka jaetaan seuraavasti:

- tuulettumattomiin (esim. suljetut tilat, joita ei ole erikseen lämmöneristetty)
- lievästi tuulettuviin (esim. betonielementtien tuuletusuritukset)
- hyvin tuulettuviin (esim. ulkoseinärakenteiden koko alueelta hyvin tuulettuvat tuuletusraot), jolloin ulkopuolisena pintavastuksena voidaan käyttää sisäpuolisen arvoa ($R_{se} = R_{si}$).

Myös vaakasuoran eristetyn yläpohjan ja kaltevan vesikaton muodostamassa kattorakenteessa oleva tila voidaan huomioida lämpöteknisesti homogeenisena kerroksena.

3.2 Kokonaislämmönvastus

Ohjeessa on esitetty SFS-EN ISO 6946:2017 [2] mukainen homogeenisista ja epähomogeenisista ainekerroksista koostuvien rakenneosien lämmönvastuksen yksinkertaistettu laskentamenetelmä.

Homogeenisista, lämpövirtaan nähden kohtisuoraan olevista ainekerroksista muodostuvan tasomaisen rakenneosan kokonaislämmönvastus R_{tot} lasketaan kaavasta:

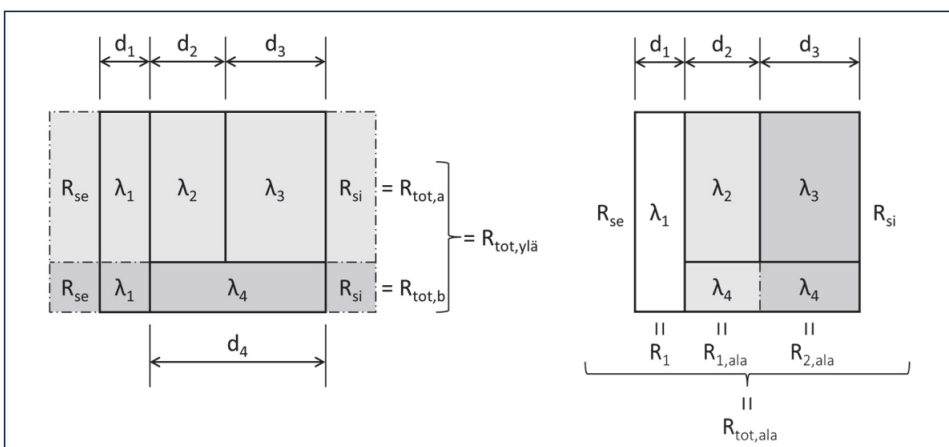
$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (5)$$

missä R_{si} = sisäpuolinen pintavastus
 R_{1-n} = eri kerrosten lämmönvastusten suunnitteluarvoja
 R_{se} = ulkopuolinen pintavastus

Epähomogeenisista ainekerroksista koostuvan rakenneosan kokonaislämmönvastus R_{tot} lasketaan lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvojen keskiarvona:

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,ylä} + R_{tot,ala}}{2} \quad (6)$$

missä $R_{tot,ylä}$ = kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo
 $R_{tot,ala}$ = kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo



Kuva 1. Kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvon lohkot ja alalikiarvolaskennan kerrokset.

Ylälikiarvo lasketaan lämpövirran kulkusuunnassa eli kohtisuoraan läpi koko rakenteen, kunkin yhtenäisen lohkon pinta-alaosuuksien mukaisena kokonaislämmönvastuksena. Alalikiarvo lasketaan olettaen, että kaikki rakenteen sisä- ja ulkopintojen kanssa yhdensuuntaiset tasot ovat isotermisiä tasoja (ts. lämpövirran kulkusuuntaa vastaan olevien materiaalien kerrosrajojen tasolla lämpötila on aina sama myös yhtenäisten materiaalikerrosten kohdalla). Yksinkertaistettua laskentamenetelmää käytettäessä lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon suhde ei saa olla suurempi kuin 1,5 eikä eristekerroksessa saa olla sen läpäisevää metallirakennetta.

4. Lämmönläpäisykertoimen laskenta

Korjaamaton U-arvo lasketaan rakenneosan kokonaislämmönvastuksen R_{tot} käänteisarvona:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (7)$$

4.1 Lämmönläpäisykertoimeen tehtävät korjaukset

Rakenneosan korjattua U-arvoa U_c käytetään suunnittelun ja lämpöhäviölaskelmien lähtötietona. Rakenneosan korjattu U-arvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$U_c = U + \Delta U = U + \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r (+ \Delta U_\psi) \quad (8)$$

missä ΔU = U-arvon korjaustermi
 ΔU_g = ilmarakojen korjaustekijä
 ΔU_f = mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä
 ΔU_r = käännettyjen kattojen korjaustekijä
 ΔU_ψ = viivamaisten säännöllisten kylmäsiltojen korjaustekijä (ei standardissa)

Korjaustekijöillä on mahdollista huomioida rakenteen ominaisuuksia seuraavasti:

- ilmarakojen korjaustekijä ottaa huomioon ilmarakojen koosta, suunnasta ja sijainnista riippuvan säteilyllä ja konvektiolla tapahtuvan lämmönsiirtymisen
- mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä ottaa huomioon lämmöneristekerroksen läpäisevien kiinnikkeiden välityksellä johtuvan lämpöhäviön
- käännettyjen kattojen korjaustekijä ottaa huomioon ylimääräisen lämpöhäviön, mikä aiheutuu sadeveden virtauksesta lämmöneristeen saumojen kautta vedeneristyksen pinnalle
- viivamaisten säännöllisten kylmäsiltojen (esimerkiksi teräsranka) korjaustekijää ei ole standardissa, mutta vaikutus lämmönläpäisykertoimeen on mahdollista laskea ohjeen ja tuotevalmistajan ilmoittaman viivamaisen lisäkonduktanssin ψ_k , W/(mK) avulla.

4.2 Luonnollinen konvektio

Luonnollista konvektiota voi esiintyä avohuokoisissa lämmöneristeissä, joissa ilma pääsee virtaamaan eristekerroksen sisällä. Tutkimusten mukaan yläpohjarakenteissa esiintyy sisäistä konvektiota tai muuta lämmönsiirtymistä aiemmin arvioitua enemmän ja aihetta on syytä tutkia enemmän.

Erityisesti yläpohjarakenteet, joissa lämmöneristeen yläpinta avoin, on syytä tarkistaa laskemalla modifioitu Rayleigh'n luku, Ra_m kaavalla:

$$Ra_m = 3 \cdot 10^6 \frac{d k \Delta T}{\lambda} \quad (9)$$

missä ΔT = lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero, °C
 d = tarkasteltavan lämmöneristeen paksuus, m
 k = tarkasteltavan lämmöneristeen permeabiliteetti, m²
 λ = tarkasteltavan lämmöneristeen lämmönjohtavuus, W/mK

Valitettavasti permeabiliteetin laskennassa tarvittava lämmöneristeen ilmanläpäisevyysarvo ei ole suoritustasoilmoituksen pakollinen tieto, eikä sitä ole valmistajilta saatavilla kaikille tuotteille. Suuntaa antavia suunnitteluarvoja on tästä syystä esitetty ohjeen liitteen 2 taulukoissa.

4.3 Maanvastaisten rakenteiden lämmönläpäisykertoimen laskenta

Ohjeessa on käsitelty maanvastaisten rakenteiden U-arvon laskentaa standardin SFS-EN ISO 13370:2017 [3] mukaisesti. Maanvastaisten rakenteiden laskennassa huomioidaan muun muassa:

- maan lämpötekniset ominaisuudet
- pintavastukset
- suhteellinen lattiamitta (maassa tapahtuvan lämmönsiirron kolmiulotteisuuden takia)
- lattioiden ja maanpinnan alapuolella olevien kellarikerroksen seinien ekvivalentti paksuus
- reunalla olevat vaaka- ja pystysuuntaiset eristykset

Kosteuden muuntotekijän laskennassa käytettävä kosteuspitoisuuden laskenta-arvo riippuu lämmöneristeen ominaisuuksista ja rasitusolosuhteista. Eri tavoin käsiteltäviä rakenteita ovat:

- routaeriste
- käännetyn katon lämmöneriste
- sokkelin ja kellarin seinän ulkopuolinen pystyeristys maata vasten
- sokkelin sisäpuolinen tai sokkelihalkaisun pystyeristys sekä mv-alapohjan lämmöneristys

5. Yhteenveto

Lämmönläpäisykertoimen laskennassa on uusissa rakenteissa käytettävä ensisijaisesti tuotevalmistajan antamia arvoja. Tästä syystä olisi suositeltavaa, että materiaalivalmistajat ilmoittaisivat lämmöneristemateriaalien osalta kaikki tarvittavat arvot. Vanhojen rakenteiden lämmöneristävyyttä laskettaessa ei voida käyttää uusien vastaavantyyppisten materiaalien arvoja.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN ISO 10456:2007+AC:2009. Rakennusaineet ja tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menettelytavat ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. SFS ry.
- [2] SFS-EN ISO 6946:2017. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017). SFS ry.
- [3] SFS-EN ISO 13370:2017. Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods SFS ry.

Tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon mittaus- ja säätöohjeet

Lari Eskola¹, Sami Mäkinen² ja Juhani Hyvärinen³

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy

² Taitotalo

³ Talotekninen teollisuus ja kauppa ry

Tiivistelmä

Tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon säätäminen on osoittautunut haastavaksi, kun pyritään mahdollisimman pieneen paine-eroon rakennuksen vaipan yli. Laadittu uusi ohjeistus on tarkoitettu käytettäväksi apuna tiiviiden rakennusten koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän säätämiseen. Ohjeissa on käsitelty mittaus- ja säätötyötä sekä tilaajan että urakoitsijan kannalta. Ohjeistus on tarkoitettu myös oppilaitoksille opetuskäyttöön. Ohjeet liittyvät rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tuottamien ilmavirtojen ja paine-erojen hallintaan ja siinä esitetään tavoitesuosituksia säätötyössä tavoiteltaville paine-eroille. Ohjetta voidaan käyttää apuna myös muiden rakennusten ilmanvaihdon säätötyössä. Mittaajan ohjeen tavoite on yhtenäistää työskentelytapoja ja näin saada ilmanvaihdon mittauksesta ja tasapainottamisesta tasalaatuisempaa. Tavoitteena on myös saada ilmanvaihtojärjestelmät toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Tässä ohjeistuksessa on koottuna mahdollisimman monipuolisesti tietoa ilmanvaihdon mittauksesta- ja tasapainotuksesta. Ohjeistus antaa lukijalle tietoa suhteellisen säädön toiminnasta ja siihen liittyvien mahdollisten ongelmien ratkaisuksista. Ohjeistuksessa esitellään erilaisia mittaustapoja ja niiden soveltuvuutta erilaisiin kohteisiin. Ohjeeseen on myös suositukset mittaus- ja säätötyön raportoinnista.

1. Johdanto

Uutta ilmanvaihdon mittaus ja säätöohjeistusta lähdettiin tekemään, koska huomattiin kentällä työskentelytapojen olevan hyvin kirjavia ja monissa kohteissa mittauspöytäkirjojen olevan puutteellisia. Uuden asetuksen [1] myötä tarvitaan enemmän ohjeistusta sekä osaamista mittaus ja säätötyön suorittamiseksi.

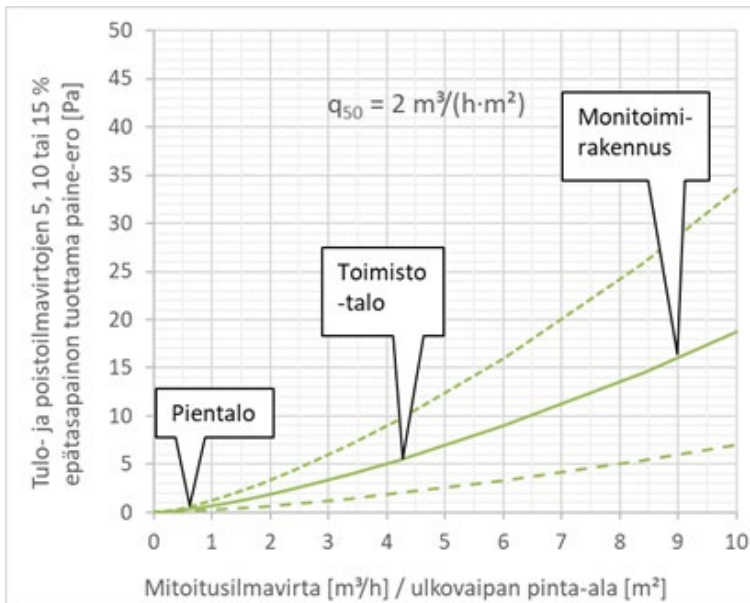
Tässä esiteltävän mittaus ja säätöohjeistuksen tavoite on yhtenäistää työskentelytapoja ja näin saada ilmanvaihdon mittauksesta ja tasapainottamisesta tasalaatuisempaa. Tavoitteena on myös saada ilmanvaihtojärjestelmät toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Tehtyyn ohjeistukseen on koottuna mahdollisimman monipuolisesti tietoa ilmanvaihdon mittauksesta- ja tasapainotuksesta. Ohjeistus antaa lukijalle tietoa suhteellisen säädön toiminnasta ja siihen liittyvien mahdollisten ongelmien ratkaisuksista. Ohjeistuksessa esitellään erilaisia mittaustapoja ja kerrotaan minkälaiset mittaustavat soveltuvat mihinkin kohteeseen.

Ohjeistus on kaksiosainen. Ensimmäinen osa on tarkoitettu rakennuksen painesuhteiden esiselvitykseen sekä säätötyön tavoitteiden asettamiseen säätötyössä sekä tilaajan että urakoitsijan kannalta. Tavoitteena on saada säätötyön avulla rakennukseen mahdollisimman hyvät painesuhdetasot. Toinen osuus on tarkoitettu mittauksen ja säädön tekijöille sekä oppilaitoksille käytettäväksi koulutuksessa. Osa käsittää ohjeet ilmavirtojen mittaukselle ja tasapainotukselle. Ohjeistuksessa otetaan kantaa mittauksen ja tasapainotuksen raportointiin, jotta se olisi mahdollisimman selkeää ja monipuolista rakennuksen käyttäjälle, omistajalle sekä seuraavalle mittaajalle.

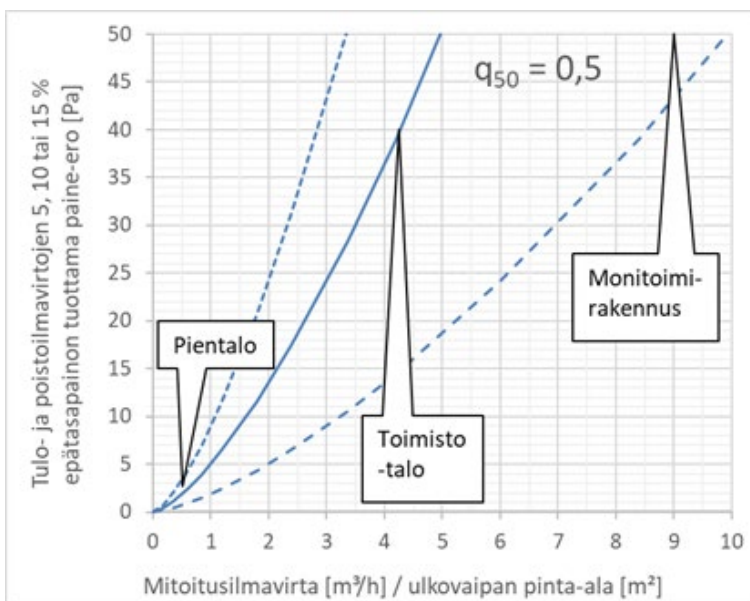
Mittaus ja säätöohjeen tarkoitus on parantaa ilmanvaihdon toiminnan varmistamista sekä täydentää osaltaan SuLVI:n ilmanvaihdon kuntotutkimusohjeistusta [3] ja IV-katselmusohjeistusta [4].

2. Ilmanvaihdon säätöohjeet tiiville rakennuksille

Säätötyön onnistuminen rakennuksen ilmanvaihdon toiminnan kannalta on erittäin tärkeää. Virheet säädössä ja ilmavirtojen mittauksessa saattavat johtaa tiiviin vaipparakenteen kanssa suuriin paine-eroihin rakennuksen vaipan yli ja hallitsemattomiin vuotoilmavirtoihin rakennuksen vaipan yli.



Kuva 1. Ilmanvaihdon tuottaman paine-eron riippuvuus ilmavirtojen epätasapainon suuruudesta, kun q_{50} on $2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Epätasapaino 5 10 ja 15 % esitetty kuvaajassa.



Kuva 2. Ilmanvaihdon tuottaman paine-eron riippuvuus ilmavirtojen epätasapainon suuruudesta, kun q_{50} on $0,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Epätasapaino 5 10 ja 15 % esitetty kuvaajassa.

Ennen säätötyöhön ryhtymistä tulisi selvittää rakennuksen vallitsevat painesuhteet mittaamalla. Tämän perusteella voidaan tehdä arvio säätötyön haasteista. Joissakin tapauksissa on tarvetta tehdä muutoksia tai korjauksia olemassa olevaan järjestelmään, jos ilmanvaihdon säätötyön tavoitteeksi asetetaan mahdollisimman vähäiset ali/ylipaineet rakennuksen ulkovaipan ylitse tavoitteeksi.

2.1 Säädettävyyden varmistaminen

Säätötyön yhteydessä tulisi tehdä tai teettää säädettävyydstarkestelu, jonka avulla voidaan arvioida säätötyön tavoitteiden toteutumista. Säädettävyydstarkestelun tekee järjestelmän suunnittelija, joka varmistaa, että järjestelmän säätöarvot on mahdollista asettaa siten, että järjestelmää voidaan säätää hallitusti.

2.2 Säädön onnistumisen varmentaminen paine-eron seurantamittauksella

Vaativassa kohteessa tulisi ilmanvaihdon säätötyön jälkeen toteuttaa paine-eron seurantamittaus, jossa sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa mitataan tallentavilla mittalaitteilla vähintään 1–2 viikon ajan. Erillistä seurantamittauksia ei tarvita, mikäli kohteeseen on asennettu jatkuvatoiminen mittauslaitteisto, jonka toiminta on testattu. Tällöin voidaan hyödyntää jatkuvan mittauksen aineistoa.

3. Ilmavirtojen mittaus ja tasapainotus

3.1 Ilmavirtojen mittaaminen

Ilmamäärien mittaus ja säätötyö voidaan toteuttaa useammalla eri toimintatavalla. Työvaiheita ei voida aina tehdä samassa järjestyksessä, kohteissa vallitsevien olosuhteiden ja kohteiden erilaisuuden takia. Ilmanvaihdon mittaus ja säätötyössä on kuitenkin suoritettava tietyt työvaiheet ennen, kuin työtä voidaan jatkaa eteenpäin. Työvaiheiden järjestys ja tarpeellisuus on kohdekohtaista. Työjärjestystä hyödyntämällä pystyy tekemään kohdekohtaisen säätösuunnitelman kohteen vaatimusten mukaisesti.

3.2 Vaipanylimittaus mukaan säätötyöhön

Ilmanvaihdon mittaus- ja säätötyön aikana tehtävät vaipan yli paine-eromittaukset toimivat merkittävänä apuna ilmanvaihdon mittaus ja säätötyön laadun varmistajana. Vaipan yli paine-eromittauksista saadaan varmuutta sille, että ilmanvaihdon mittaus- ja säätötyössä tavoiteltavat rakennuksen ja ulkoilman väliset painesuhteet pysyvät suositeltujen raja-arvojen sisällä. [2] Koska säätötyön vaatimukseen kuuluu se, että ilmanvaihdon oikealla toiminnalla vaipan yli paine-erot eivät ole liian suuria, on vaipan yli paine-eroihin reagoitava säätötyön yhteydessä. Säätötyön aikana pystytään vaikuttamaan paine-erojen muutoksiin. Säätötyön aikana pystytään tekemään tiettyjä korjauksia, joilla rakennuksen paine-erot saadaan hallintaan siten, että ilmamäärien mittaus ja säätötyö saadaan suoritettua hyväksytysti. Mahdollisissa muutoksissa on syytä huomioda se, että painesuhteiden tasaaminen voi vaatia suunniteltujen ilmamäärien päivytystä yhdessä suunnittelijan tai valvojan kanssa.

3.3 Mittauspöytäkirjat

Ilmanvaihdon mittaus- ja säätötyöstä pitää tehdä loppuraportointi. Loppuraportointi pitää sisällään mittauspöytäkirjan sekä kirjallisen raportin säätötyöstä. Kirjalliseen raporttiin merkitään

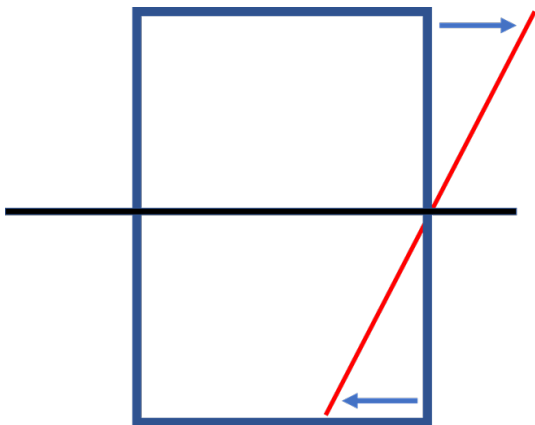
kaikki ilmanvaihdon mittauksessa ja säädössä ilmenneet puutteet ja poikkeamat. Loppuraportoinnin tarkoituksena on selventää mittauspöytäkirjan lukemista, sekä selventää mittaus- ja säätötyön aikana ilmenneitä puutteita ja poikkeavuuksia. Ohjeistuksessa esitetään esimerkit suositeltavista mittauspöytäkirjamalleista. Mittauspöytäkirjaan suositellaan kirjattavaksi kohteentiedot, mittaustuloksen lisäksi mm. vaipan yli mitatut paine-erot.

3.4 Ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan varmistaminen

Ilmanvaihdon toiminnan varmistaminen kuuluu osaksi ilmanvaihdon mittaus- ja säätötyötä. Säätötyön yhteydessä tehtävät ilmanvaihdon toiminnan tarkastukset vaihtelevat jonkin verran, riippuen säädettävistä kohteista. Uudiskohteiden ja vanhojen kohteiden (ilmanvaihdon mittaus ja säätö suoritettu aikaisemmin) ilmanvaihdon toiminnan tarkastukset eroavat toisistaan. Säätötyön toteutuksen kannalta uudiskohteissa tehtävät toiminnan tarkastukset ovat laajempia ja tarkempia kuin vanhoissa kohteissa. Uudiskohteissa ilmanvaihdon toiminnan tarkastusta pitää tehdä ennen säätötyön aloitusta sekä säätötyön aikana ja sen jälkeen. Uudiskohteissa ilmanvaihdon toiminnan tarkastuksessa on otettava huomioon myös rakennuksen kokonaistoimintaa. Vanhoissa kohteissa ilmanvaihdon toiminnan tarkastuksessa pystytään hyödyntämään kohteesta saatavia aikaisempia tietoja, jolloin ilmanvaihdon toiminnan tarkastusta tehdään suurimmalta osin säätötyön yhteydessä. Toisinaan kohteista saatava tieto voi olla vähäistä tai kokonaan puutteellista, jolloin ennen säätötyötä pitää suorittaa erillinen ilmanvaihdon toiminnan kartoitus.

3.5 Neutraaliakselin määrittäminen

Ennen säätötyön aloittamista tulee mittaamalla määrittää rakennuksen paine-eron neutraaliakseli. Neutraaliakselilla tarkoitetaan sitä kohtaa rakennuksessa, jossa paine-ero rakennuksen pystysuoralla pinnalla on 0 Pa. Neutraaliakselin sijainnin määrittäminen suositellaan suorittamaan ennen mittaus ja säätötyön aloittamista.



Kuva 3. Paine-ero rakennuksen vaipan yli. Neutraali akseli muodostuu rakennuksen puoleen väliin, kun painesuhteisiin vaikuttavat vain rakennuksen tiiveys ja ilman tiheyserot.

Neutraaliakselin alapuolella rakennus on alipaineinen ja yläpuolella ylipaineinen rakennuksen paine-eron mittausohjeen mukaisesti suoritetulla mittauksella [2].

4. Paine-erojen tavoitetasot

4.1 Asuinrakennukset

Asuinrakennuksiin suositeltavat painesuhteet on valittu siten, että asuinrakennukseen jäisi

mahdollisuuksien mukaan vähäinen alipaine. Normaalisissa käyttötilanteissa päästään säätämällä välille 0...-5 ja 0...-10 Pa. Tehostustilanteet täytyy tarkastella erikseen ja varmistaa, että korvausilmareitit myös tehostuksen ajalle ovat toimivia.

Taulukko 1. Asuintalojen paine-erojen tavoitetasot koneellisella tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmällä varustetussa asuinrakennuksessa.

Rakennuksen tyyppi	Normaali käyttötilanne	Maksimi-arvo	Lisätiedot
Asuinpientalo	0...-5 Pa	+2...-15 Pa (tehostus)	Pieni mitoitussilmavirta suhteessa ulkovaipan alaan
Asuinkerrostalo	0...-10 Pa	0...-15 Pa (tehostus)	Pienissä huoneistoissa suuri mitoitussilmavirta suhteessa ulkovaipan pinta-alaan

4.2 Opetus, liike- ja toimistorakennukset ja muut rakennukset

Opetus, liike- ja toimistorakennuksiin sekä muihin rakennuksiin suositellaan taulukon 2 mukaisia paine-eroja rakennuksen vaipan ja tilojen välille. Normaalin käyttötilanteen rajat ovat +5...-5 Pa, joka voidaan saavuttaa, kun säätötyön yhteydessä käytetään paine-ero mittausta. Maksimi -arvo suosituksen tavoitetasojen ylittyessä tulisi selvittää ylityksiin johtavat syyt.

Taulukko 2. Toimisto- liike- ja opetusrakennusten sekä vaativien kohteiden paine-erojen tavoitetasot.

Rakennuksen tyyppi	Normaali käyttötilanne	Maksimi-arvo	Lisätieto
Toimisto-, liike- tai opetusrakennus	+5...-5 Pa	+5...-10 Pa	Ei erillispoistoja, mitoitussilmavirta noin 2 l/(s·m ²) vähäinen kosteuslisä
Paine-erojen hallinnan kannalta vaativa kohde	+5...-15 Pa	Määritetään tapauskohtaisesti	Muuttuvilmavirtaiset ja siirtoilman käyttöön perustuvat järjestelmät, suuret mitoitussilmavirrat, yli 25 m korkea rakennus

5. Yhteenveto

Uusi mittaus- ja säätöohje tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon säätämiseen tuo apua rakennusten ilmavirtojen ja painesuhteiden hallintaan. Tavoitteena on, että tämän ohjeistuksen avulla saadaan koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän toiminta säädettyä. Rakennuksen vaipparakenteeseen kohdistuva yli- tai alipaine saadaan hallintaa tai ainakin tiedetään missä kohdissa on haasteita ilmavirtojen hallinnan ja painesuhteiden osalta. Tiivis vaipparakenne asettaa uusia haasteita ilmanvaihdon säädölle. Ohjetta voidaan käyttää apuna myös vähemmän tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon säätämisessä. Ensimmäinen osa on tarkoitettu avuksi säätötyön tilaajalle. Ohjeen toisessa osassa käsitellään suhteellista säätöä ja se on tarkoitettu myös oppilaitoksille opetuksessa käytettäväksi. Ohjeessa esitetään myös paine-erojen tavoitetasoja tiiviille rakennuksille. Nämä tasot on tarkoitettu suosituksiksi, kun rakennuksen ilmanvaihdon säätötyöhön ollaan ryhtymässä.

6. Kiitokset

Näiden oppaiden tekemiseen on osallistunut artikkelin kirjoittajien lisäksi asiantuntijat Jan Lindholm, Janne Määttä, Jussi Luoma, Janne Penttilä ja Jouni Näppi. Hanketta ovat rahoittaneet ja ohjausryhmään osallistuneet seuraavat henkilöt ja yritykset Antti Alanko Are Oy, Petri Valve ja Jukka Järvinen Cervi Oy, Esa Huuskonen Climecon Oy, Jukka Blåfield Ebm-papst, Tom Palmgren Enervent Zehnder Oy, Kadi Alber ETS Nord Oy, Jari Hokkanen FläktGroup Finland

Oy, Taneli Timlin Koja Oy, Pasi Sauvolainen Lindab Oy Ab, Sami Pietilä Pietiko Oy, Teemu Taipale Sweco Asiantuntijapalvelut Oy, Marko Björkroth Sweco Talotekniikka Oy, Lars Norrdal Swegon Oy, Petri Koivunen Vallox Oy, Climecon Oy, Cervi Oy, Oy, ja Samuli Könkö SuLVI ry. Työ jatkuu.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Asetuksen voimaantulopäivä 1.1.2018. Ympäristöministeriö 2017.
- [2] Rakennusten paine-erojen mittausohje -projekti, loppuraportti (2019). <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>
- [3] SuLVI:n ilmanvaihdon kuntotutkimusohjeet 2016. <https://sulvi.fi/materiaalipankki/iv-kuntotutkimushanke/>
- [4] Ilmanvaihdon katsastusopas, Hallittua sisäilmastoa. Ympäristöministeriö 2022, ensimmäinen painos. <https://tilatjaterveys.fi/ohjelma/oppaita-ja-selvityksia>

Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma on koonnut useita ohjeita sisäilmatilanteiden hallintaan

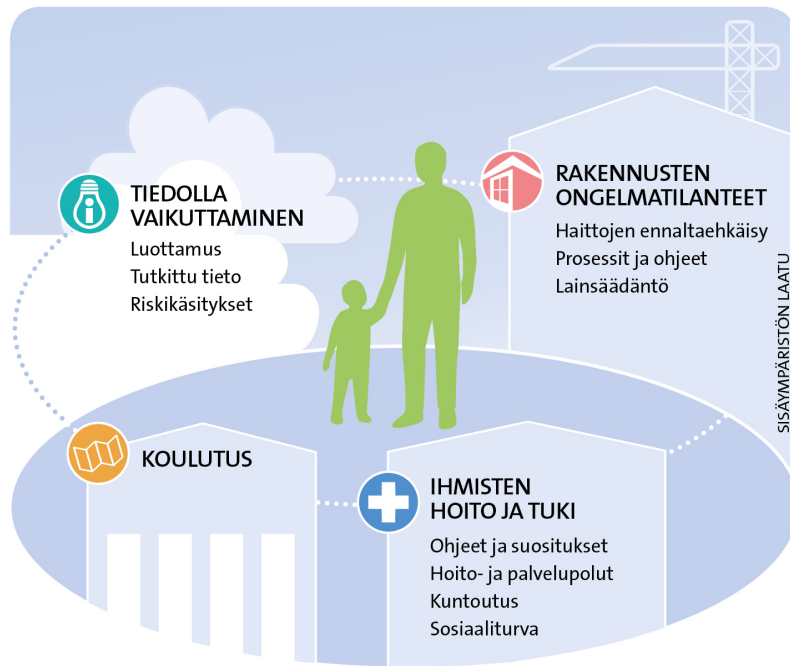
Kaisa Jalkanen, Anniina Salmela ja Anne Hyvärinen
Terveyden ja hyvinvoinnin laitos

Tiivistelmä

Kymmenvuotisen Terveet tilat 2028 -toimenpideohjelman Terveyden ja hyvinvoinnin edistämisen osa-aluetta toteuttaa Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen (THL) koordinoima Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma. Ohjelma toteutetaan yhteistyössä THL:n, Työterveyslaitoksen, Filha ry:n, Hengitysliiton, Allergia-, Iho- ja Astmaliiton sekä Sisäilmayhdistys ry:n kanssa. Yhtenä kansallisen sisäilma ja terveys -ohjelman päätavoitteena on kehittää sisäympäristöihin liittyvien ongelmien hallintaa ja tavoitteen saavuttamiseksi on ohjelmassa julkaistu ohjeita ja toimintamalleja rakennusten ongelmatilanteiden selvittämiseen sekä koottu laajasti muuta tietoa aiheeseen liittyen. Toimintamalleja on luotu työpaikoille sekä koulu- ja päiväkotirakennusten sisäilmatilanteisiin, mutta myös asuntojen sisäilmatilanteita koskien. Lisäksi tilanteiden selvittämistä tukemaan on julkaistu tietoa erilaisiin sisäympäristön epäpuhtauksiin liittyen sekä esimerkiksi rakennusten käyttöä turvaavista toimenpiteistä ja mikrobivaurio korjausten jälkeisestä siivouksesta.

1. Johdanto

Kansallisen sisäilma ja terveys -ohjelman (kuva 1) tavoitteena on kehittää sisäympäristöön liittyvien ongelmien hallintaa. Konkreettisesti tämä tarkoittaa toimenpiteitä, jotka tukevat erityisesti julkisten rakennusten sisäilmatilanteen paranemista. Tavoitetta edistämään on julkaistu ohjeistuksia, joissa on pyritty korostamaan ongelmien ennaltaehkäisyä muun muassa kiinteistönhoidollisin, rakennuksen oikean käytön ja myös rakennuksen käyttäjien perehdyttämisen keinoin. Toimintamalleissa on korostettu eri toimijoiden roolien ja vastuiden selkeyttä sisäilmatilanteen selvittämisessä, unohtamatta viestintää. Erityisesti olosuhdearviointia tukemaan on tuotettu lisäksi useita katsauksia sisäympäristöissä esiintyvistä epäpuhtauksista, niiden mittaamisesta sekä pitoisuustasoista työpaikoilla ja myös asunnoissa.



Lähde: THL 2018

Kuva 1. Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma toimii neljällä osa-alueella: tiedolla vaikuttaminen, rakennusten ongelmatilanteet, ihmisten hoito ja tuki sekä koulutus.

2. Ohjeita ja toimintamalleja on luotu työpaikkojen, erityisesti koulu- ja päiväkotirakennuksien sisäilmatilanteita mutta myös asuntoja koskien

2.1 Koulu- ja päiväkotirakennusten sisäilmatilanteen selvittämiseen liittyvät ohjeet

THL on julkaissut ohjeistusta erikseen sekä rehtoreille [1] että päiväkotien johtajille [2] sisäilmatilanteeseen sekä toimintamallin koulu- ja päiväkotirakennuksen sisäilmatilanteen selvittämiseen [3]. Ohjeistuksissa rehtoreille ja päiväkodin johtajille käydään läpi, mitä sisäympäristöön liitetyn haitan selvittämisessä eri vaiheissa yleisimmin tapahtuu, keitä tilanteen selvittämiseen osallistuu ja mikä on heidän roolinsa. Koulu- ja päiväkotirakennusten sisäilmatilanteiden selvittämisprosessi pohjautuu Terveet tilat 2028 -toimintamalliin [4], korostaen sisäilmatilanteiden ennaltaehkäisyä sekä koulujen ja päiväkotien erityispiirteitä.

Lisäksi THL on julkaissut kattavasti muun muassa edellä mainittuja ohjeistuksia yhteen vetävän ”Ohjeita koulutyöhön sisäilmatilanteessa” -julkaisun [5], jossa on erityisesti selkeytetty opiskeluhoitoon toimijoiden, eritoten kouluterveydenhuollon, toimintaa osana sisäilmatilanteen selvitysprosessia sekä ohjeistetaan kaikkia kouluympäristössä toimivia esimerkiksi väistötilaratkaisuihin ja lapsen yksilölliseen tuen tarpeeseen liittyen.

2.2 Ohjeistusta työpaikoille

Työterveyslaitos on tehnyt työkyvyn tuen mallin työpaikkojen sisäilmatilanteisiin, joka löytyy Työterveyslaitoksen verkkosivuilta [6]. Mallin kehittämisen ja tutkimustyössä käytettiin kysely- sekä työpaja-aineistoa, jotka oli kohdistettu johdon, työsuojelun, henkilöstöhallinnon, tilahallinnon tai kiinteistönomistajan sekä työterveyshuollon edustajille eri työpaikoilla [7]. Toimintamalli on tarkoitettu juurruttamaan työpaikkojen sisäilmatilanteiden ratkaisuprosessiin ja työkykyjohtamisen malleihin.

Ohjeet sisäilmastaselvityksen ja olosuhdearvion [8] sekä terveydellisen merkityksen arvion [9] tekemiseksi työpaikoilla on myös uudistettu Työterveyslaitoksen toimesta. Olosuhdearvioinnin tekemisen tueksi on Kansallisessa sisäilma ja terveys -ohjelmassa koostettu uusin tieto erilaisista sisäympäristön epäpuhtauksista (ks. luku 3). Terveydellisen merkityksen arvioinnissa on ohjeistettu tiedon kokoamista sisäilmatilanteeseen vaikuttavista eri tekijöistä ja niiden merkityksen arviointia työntekijöiden terveydelle ja hyvinvoinnille.

Työterveyslaitoksen ”Ohje korjausten jälkeiseen siivoukseen ja irtaimiston puhdistamiseen työpaikoilla” on tarkoitettu korjausten jälkeisiä siivouksia tekevien ja niitä tilaavien käyttöön [10]. Ohje soveltuu toimistojen ja toimistojen kaltaisten tilojen, kuten päiväkotien ja koulujen korjausten jälkeiseen siivoukseen ja irtaimiston puhdistukseen. Ohjetta voidaan hyödyntää myös silloin, kun irtaimistoa siirretään kosteus- ja mikrobivaurioituneista tiloista toisiin tiloihin.

2.3 Ohjeita asunnoille

THL on koonnut toimintamallin sisäilmatilanteiden ratkaisemiseen myös asunnoille [11]. Toimintamallissa nostetaan esiin ongelmien ennaltaehkäisyyn lisäksi sisäilmatilanteen selvitysprosessin määrittämisen tärkeys ja erityispiirteet erityisesti asunto-osakeyhtiöissä sekä vuokrakiinteistöissä ja -asunnoissa mutta muistutetaan myös omakotikiinteistön omistajan vastuuta sisäilmatilanteissa.

THL on julkaissut myös erityisesti yksityishenkilöille ja asuntoihin suunnatun ohjeen kosteus- ja mikrobivauriokorjausten jälkeiseen siivoukseen ja irtaimiston puhdistamiseen [12]. Ohjeessa on selvitetty lisäksi kunnossapitovastuun jakautumista asunto-osakeyhtiön ja osakkaan välillä sekä vastuiden jakautumista sisäilmatilanteissa.

Ohje asumisterveyden huomioimisesta energiansäästötoimissa [13] antaa ajankohtaisia, konkreettisia ja koko sisäympäristön huomioon ottavia neuvoja asuntojen energiansäästöön turvallisesti ja terveellisesti.

2.4 Muita julkaisuja

THL on koonnut julkaisun rakennusten käyttöä turvaavien toimenpiteiden käytöstä [14]. Yhteenvedossa esitellään yleisesti käytettyjä rakennusten käyttöä turvaavia toimenpiteitä sekä käytännön kokemuksia niiden toimivuudesta erilaisissa tilanteissa.

Sisäilmayhdistys on tehnyt Hyvä sisäilma -suosituksen rakennusten käyttöajan ulkopuoliseen ilmanvaihtoon liittyen [15]. Suosituksen taustana on kuntien sisäilmaverkoston kokoama ilmanvaihdon yleisohje ja perustelumuistio [16], jonka kokoamisessa on ollut mukana ilmanvaihdon asiantuntijoita Sisäilmayhdistys ry:stä, kunnista, tutkimuslaitoksista, yliopistoista ja sisäilma-alan konsulttiyrityksistä. Sekä Hyvä sisäilma -suositus että ohje ja perustelumuistio löytyvät Sisäilmayhdistyksen verkkosivuilta (<https://www.sisailmayhdistys.fi/Julkaisut/Hyva-sisailma-suositukset>).

3. Katsauksia sisäympäristöjen epäpuhtauksista on julkaisu laajasti

Työterveyslaitoksen asiantuntijat ovat laatineet katsauksen teollisista mineraalikuuduista [17] sekä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (VOC) [18] työpaikoilla. Katsaukset sisältävät kirjallisuuskoosteen sekä pitoisuustasojen tarkastelua ensisijaisesti toimistotyyppeissä

työpaikoissa. Katsauksissa arvioidaan päästölähteitä ja niihin liittyviä pitoisuuksia, mahdollisia terveyshaittoja, mittausmenetelmiä sekä näiden päästöjen hallintakeinoja.

THL on puolestaan koonnut yhteistyössä Työterveyslaitoksen kanssa julkaisun haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (VOC) asunnoissa [19]. Julkaisun pohjana on Työterveyslaitoksen asuntoaineisto sekä edellä mainittu julkaisu VOC-yhdisteistä työpaikoilla.

Työterveyslaitoksen ja THL:n asiantuntijat ovat yhdessä laatineet katsauksen, johon on koottu viimeisin tieto suomalaisen väestön altistumisesta puolihaihtuville orgaanisille yhdisteille (SVOC) ja altistumiseen liittyvistä terveysriskeistä [20]. Lisäksi THL on koostanut yhteenvedon, jossa käsitellään kivihiilitervapohjaisten tuotteiden käyttöä asuinrakentamisessa ja niiden huomioimista mahdollisessa terveyshaitan selvittämisessä ja poistamisessa [21].

THL on koonnut mikrobikatsauksen [22], joka selvittää tutkimuskirjallisuuden perusteella asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen mukaisten sekä muiden tutkimuskäytössä olevien mikrobikasvustoa ja -lähteitä osoittavien menetelmien käytettävyyttä rakennusten mikrobikasvuston osoittamisessa. Lisäksi yhteistyössä Työterveyslaitoksen kanssa on tehty aineistokatsaus, jossa on selvitetty kosteusvaurioindikaattoreiden esiintyvyyttä rakennusmateriaalinäyteaineistoissa [23].

Lisäksi THL on julkaissut katsauksen asuntojen, koulujen, päiväkotien ja toimistojen sisäilman pienhiukkasille ja hengitettäville hiukkasille altistumisesta Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Hiukkaslähteiden ja -pitoisuuksien sekä niihin vaikuttavien tekijöiden lisäksi katsauksessa käydään läpi mm. hiukkasten terveysvaikutukset sekä toimenpiderajat ja ohjearvot sisäilman hiukkasille. [24]

4. Yhteenveto

Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma on toimintansa ensimmäisen puolikkaan aikana julkaissut paljon tietoa erilaisista sisäympäristöjen epäpuhtauksista sekä ohjeistusta tukemaan sisäilmatilanteiden hallintaa. Oheistuksien kokoamisen tavoitteena on parantaa sisäilmatilannetta muun muassa ongelmien ennaltaehkäisyyn, nopean puuttumisen sekä vastuiden ja roolien selkeyttämisen keinoin. Jatkossa ohjelmassa panostetaan tuotetun tiedon ja ohjeistuksien jalkauttamiseen sekä tarvittaessa toimintamallien päivittämiseen käyttäjäpalautteen perusteella.

Lähdeluettelo

- [1] Salmela, A., Jalkanen, K. ja Hyvärinen, A. 2022. Ohjeistus rehtoreille sisäilmatilanteeseen. Tutkimuksesta tiiviisti 62/2022. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-408-004-0>
- [2] Salmela, A., Jalkanen, K. ja Hyvärinen, A. 2023. Ohje päiväkodin johtajille sisäilmatilanteeseen. Tutkimuksesta tiiviisti 9/2023. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-408-038-5>
- [3] Jalkanen, K., Salmela, A. ja Hyvärinen, A. 2021. Sisäilmatilanteen selvitysprosessi koulussa ja päiväkodissa. Tutkimuksesta tiiviisti 32/2021. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-672-5>
- [4] <https://tilatjaterveys.fi/toimintamalli/sisailmatilanteiden-selvittaminen>
- [5] Salmela, A., Jalkanen, K. ja Hyvärinen, A. 2023. Ohjeita koulutyöhön sisäilmatilanteessa. Tutkimuksesta tiiviisti 33/2023. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-408-116-0>

- [6] <https://www.ttl.fi/teemat/tyohyvinvointi-ja-tyokyky/sisailma/tyokyvyn-tuki-sisailmatilanteissa>
- [7] Keränen, H., Juvonen-Posti, P., Wallenius, K., Kinnari, T., Vuokko, A. ja Sainio, M. 2021. Työkyvyn tuen käytännöt työpaikoille sisäilmatilanteisiin: Moninäkökulmaisen toimintamallin yhteiskehittäminen asiantuntijoiden kysely- ja työpaja-aineistojen avulla. Tietoa työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-261-987-7>
- [8] Isokääntä, P. ja Rautiala, S. 2023. Sisäilmastaselvitys ja olosuhdearviointi: Ohje työpaikkojen sisäilmastaselvityksiä ja olosuhdearviointeja tekeville. Tietoa työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-037-9>
- [9] Reijula, K., Korenius, P., Keränen, H., Tulenheimo-Eklund, E., Vuokko, A. ja Sainio, M. 2022. Terveystieteellisen merkityksen arviointi sisäilmatilanteissa. Tietoa Työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-047-8>
- [10] TTL-siivousohje
- [11] Jalkanen, K., Salmela, A. ja Hyvärinen, A. 2022. Toimintamalli sisäilmatilanteiden hoitamiseen asunnoissa. Tutkimuksesta tiiviisti 44/2022. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-936-8>
- [12] Juntunen, M., Jalkanen, K., Salmela, A., Leppänen, H. ja Hyvärinen, A. 2021. Ohje asuntojen kosteus- ja mikrobivauriokorjausten jälkeiseen siivoukseen ja irtaimiston puhdistamiseen. Tutkimuksesta tiiviisti 69/2021. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-767-8>
- [13] Salmela, A. 2022. Huomioi energiasäästötoimien vaikutus asumisterveyteen.. Tiedä ja toimi. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022092860377>
- [14] Juntunen, M., Salmela, A., Jalkanen, K., Leppänen, H. ja Hyvärinen, A. 2022. Käyttöä turvaavat toimenpiteet. Tutkimuksesta tiiviisti 31/2022. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-894-1>
- [15] Hyvä sisäilma -suositus: Suositus ilmanvaihdosta rakennuksen käyttöajan ulkopuolella. 2019. Sisäilmayhdistyksen Hyvä sisäilma -suositus I (03-2019). Sisäilmayhdistys ry, Helsinki.
- [16] Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto. 2019. Kuntien sisäilmaverkosto (Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa).
- [17] Tuomi, T., Wallenius, K., Mahiout, S., Rautiala, S. ja Lappalainen, S. 2020. Teolliset mineraalikulut toimistotyöympäristöissä: Esiintyminen, altistuminen arviointi, terveysvaikutukset ja päästöjen hallinta. Tietoa työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:9789522619167>
- [18] Wallenius, K., Hovi, H., Mahiout, S., Remes, J., Rautiala, S., Jokela, P., Leino, K. ja Liukkonen, T. 2021. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyöympäristöissä: Päästölähteet, mittausmenetelmät, pitoisuustasot ja terveysvaikutukset. Tietoa työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:9789522619570>
- [19] Juntunen, M., Salmela, A., Jalkanen, K., Hovi, H., Wallenius, K. ja Hyvärinen, A. 2022. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet asunnoissa: Pitoisuustasot, yleisimmät yhdisteet ja terveysvaikutukset. Työpöytä 5/2022. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-809-5>
- [20] Wallenius, K., Korkalainen, M., Porras, S., Hovi, H., Holma, S., Ahtinen, S., Koponen, J., Huttunen, K. ja Rantakokko, P. 2023. Sisäympäristöissä esiintyvät puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet (SVOC): Väestön altistuminen ja terveysriskit. Tietoa työstä. Työterveyslaitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-114-7>
- [21] Airaksinen, R., Salmela, A. ja Pitkäranta, M. 2023. Kivihiiliterätyöt

- asuinrakennuksissa. Tutkimuksesta tiiviisti 29/2023. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-408-108-5>
- [22] Leppänen, H., Jalkanen, K., Salmela, A. ja Hyvärinen, A. 2022. Mikrobikasvuston selvittämiseen käytettävät menetelmät kosteusvauriokohteissa: kirjallisuuskatsaus. Työpaperi 56/2022. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-999-3>
- [23] Viljamaa, A., Leppänen, H., Jalkanen, K., Salmela, A. ja Hyvärinen, A. 2022. Kosteusvaurioindikaattorimikrobien rooli mikrobikasvuston määrittämisessä rakennusmateriaalista: aineistokatsaus. Työpaperi 53/2022. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki.
- [24] Yli-Tuomi, T., Siponen, T. 2023. Katsaus sisätilojen PM2.5- ja PM10-hiukkasista Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. THL Työpaperi 22/2023. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-408-117-7>

Oppaat tilaajalle sisäilmasto-ongelman ratkaisemiseen ja siihen liittyviin sopimusasioihin

Veli-Matti Pietarinen¹, Timo Turunen¹, Leif Wirtanen¹, Kiia Miettunen², Simo Kinnunen², Kalevi Setälä², Jonna Järvinen², Kai Mettälä², Sami Koskela² ja Susanna Turkia²

¹ Ramboll Finland Oy

² Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Terveet tilat 2028 -ohjelman puitteissa on laadittu kaksi sisäilmasto-ongelman ratkaisua käsittelevää opasta.

Sisäilmasto-ongelmien ratkaisemista käsittelevä opas ohjaa tilaajaa selkeän ja järjestelmällisen toimintamallin avulla hallitsemaan rakennuksissa esiintyviä sisäilmasto-ongelmia.

Toimintamallissa esitellään sisäilmasto-ongelman ratkaisemiseen liittyvät eri vaiheet sekä korostetaan tilaajan tärkeimpiä tehtäviä eri vaiheissa. Toimintamallin eri vaiheita sekä tilaajan tehtäviä on selvennetty oppaassa neljän erityyppisen sisäilmasto-ongelmatapauksen avulla. Oppaan pääpaino on julkisissa ja yksityisissä palvelu- ja toimistorakennuksissa sekä asunto-osakeyhtiöissä. Opasta voidaan soveltaa myös pientalojen sisäilmasto-ongelmien ratkaisussa.

Sopimusasioita käsittelevän oppaan tavoitteena on auttaa pientaloasukkaita ja kuluttajia ymmärtämään ja soveltamaan sisäilmastokorjauksiin liittyvää sopimustekniikkaa. Oppaassa käydään läpi sisäilmastokorjauksiin liittyvien osapuolten vastuita ja velvollisuuksia sekä niiden vaikutuksia sisäilmastokorjausten sopimusasioihin. Oppaassa tarkastellaan korjaushankkeen eri vaiheita lähtötietojen selvittämisestä takuuajasta asti. Oppaassa on vinkkejä sisäilmastokorjauksiin osallistuvien asiantuntijoiden ja urakoitsijoiden kilpailuttamiseen sekä sopimusten tekemiseen.

1. Johdanto

Rakennusten hyvän sisäilman laadun ylläpitäminen edellyttää selkeää toimintamallia sekä moniammatillista yhteistyötä. Tilaaja on keskeisessä roolissa rakennuksen sisäilmasto-ongelman ratkaisemisessa. Tilaajalla tarkoitetaan tässä oppaassa rakennuksen omistajaa, kiinteistön omistajan edustajaa / kiinteistöä vastaavaa henkilöä. Lainsäädännössä olevat käsitteet rakennushankkeeseen ryhtyvä ja rakennuttaja tarkoittavat usein tilaajaa.

Tilaajan on ryhdyttävä toimenpiteisiin sisäilmaston laadun parantamiseksi viimeistään silloin, kun rakennusten terveellisyyttä koskevassa lainsäädännössä esitetyt vaatimukset eivät täyty. Tilaajan tulisi valita rakennuksen korjaustapa ja laajuus huomioiden rakennukselle suunniteltu elinkaari ja kiinteistöstrategia. Korjaustavan valinnalla vaikutetaan sisäilmaston laadun ja rakennuksen elinkaaren lisäksi myös rakennuksen korjaus- ja ylläpitokustannuksiin sekä tilojen käytettävyyteen ja energiatehokkuuteen.

Tutkimuksia, suunnittelua ja korjaustöitä säätelevät monelta osin lait ja asetukset, mitkä tilaajan tulee huomioida hankkeeseen ryhtyessään ja töitä tilatessaan. Rakennushankkeeseen ryhtyvän ja tilaajan velvollisuuksiin ja vastuisiin kuuluu muun muassa huolehtia, että hankkeen eri osapuolilla on riittävä pätevyys ja ammattiosaaminen [1], ja että sopimuskumppanit täyttävät

lakisäätöiset velvoitteet tilaajavastuulain [2] mukaisesti. Rakennuttajan vastuuta puolestaan määrittävät työturvallisuutta säätelevät asetukset [3] ja tilaajaa voi joutua vastaamaan myös työnantajan velvoitteista laaditun sopimuksen mukaan [3-5]. Tilajalle muodostuu vastuuta ja velvoitteita myös sopimussuhteista ja -muodoista riippuen. Kuluttajan asema tilaajana on sopimusten näkökulmasta hyvin poikkeava muihin tilaajiin nähden. Rakennushankkeeseen ryhtyvän velvoitteet ja vastuut ovat samanlaiset tilaajan osaamistasosta riippumatta.

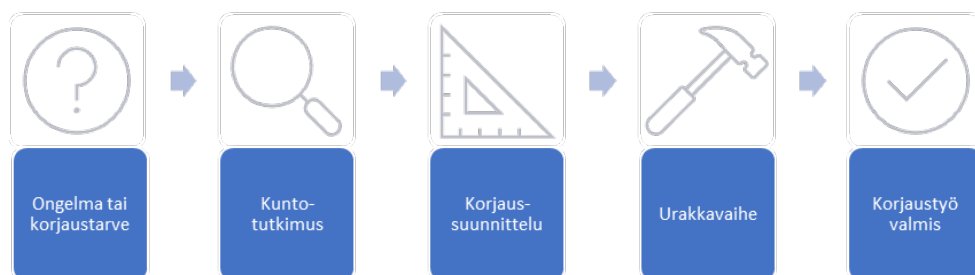
Sisäilmastokorjauksiin osallistuu useita eri tahoja korjaushankkeen eri vaiheissa. Osapuolien rooleihin ja tehtävien velvoittavuus riippuu siitä, tarvitaanko rakennuslupa. Lakien ja asetusten velvoittavuus puolestaan vaikuttaa siihen, kuka roolissa voi toimia ja millaisia pätevyyskysymyksiä henkilöltä vaaditaan. Sopimussuhteet- ja sopimusehdot määrittävät sisäilmastokorjausten osapuolten vastuuta ja velvoitteita.

Merkittävä osa sisäilmastokorjausten kustannuksista muodostuu urakkavaiheessa, mutta kustannukset määrittyvät pääosin kuntotutkimus- ja korjaussuunnitteluvaiheessa, joissa selvitetään ja päätetään tarvittavien korjausten laajuus. Puutteelliset kuntotutkimukset voivat aiheuttaa isoja yllätyksiä urakkavaiheen kustannuksiin ja aikatauluun.

2. Sisäilmasto-ongelmien ratkaisemisen toimintamalli

Syksyllä 2022 päivitettyssä Työterveyslaitoksen sisäilmaongelmien ratkaisemisen toimintamallissa on esitetty viisi päävaihetta, jotka ovat normaalit ylläpitotoimet, tilannearvio, selvitykset, korjaavat toimenpiteet ja seuranta [6]. Näiden viiden päävaiheen sisältö ja tilaajan tehtävät eri vaiheissa on kuvattu yksityiskohtaisesti sisäilmasto-ongelmien ratkaisua käsittelevässä oppaassa.

Sopimusasioita käsittelevässä oppaassa vaiheet on käsitelty korjaushankkeen näkökulmasta. Sisäilmastokorjausten päävaiheista kaksi ensimmäistä vaihetta käsittävät sisäilmasto-ongelman ratkaisemisen toimintamallin ylläpitotoimet, tilannearvion ja selvitykset. Kolme viimeistä päävaihetta sisältävät toimintamallin korjaavat toimet ja seurannan. Päävaiheiden välissä kilpailutetaan ja laaditaan sopimukset vaiheen toteuttavan tai toteuttavien tahojen kanssa.



Kuva 1. Sisäilmastokorjausten päävaiheet.

3. Normaalit ylläpitotoimet ja tilannearvio

3.1 Haitta- ja poikkeamailmoitus

Toimintamalli ohjaa tilojen käyttäjiä ilmoittamaan rakennuksessa koetuista haitoista tai poikkeamista tilaajan organisoimaan ja ylläpitämään ilmoitusjärjestelmään. Rakennuksen rakenteisiin ja taloteknisiin järjestelmiin liitetyt haitta- tai poikkeamailmoitukset selvitetään ensin kiinteistöhuollossa tilaajan laatimien ohjeiden ja käytäntöjen mukaisesti.

Jos tilojen käyttäjä epäilee koettujen oireiden liittyvän rakennukseen ja sen sisäilmastoon, häiritseminen tehdään terveydenhuoltoon. Terveydenhuollon tehtävänä on arvioida oireilevan henkilön jatkotutkimus- ja hoitotarvetta yksilötasolla sekä sisäilmasto-ongelmaan liittyviä oireita ja niiden määrää ryhmätasolla [6,7].

3.2 Kiinteistöhuollon ja terveydenhuollon selvitykset

Kiinteistöhuollon tekemien selvitysten perusteella tilaaja päättää tarvittavista huolto- ja kunnossapitotoimenpiteistä sekä tiedottaa niistä tilojen käyttäjiä. Jos sisäilmasto-ongelma ratkeaa teknisten selvitysten avulla, tilaaja määrittää seurantatoimenpiteet olosuhteiden ylläpitämiseen. Jos sisäilmasto-ongelma ei ratkea teknisten selvitysten perusteella, tilaaja perustaa kohdekohtaisen sisäilmaryhmän.

Terveydenhuolto arvioi osana kohdekohtaista sisäilmaryhmää tilojen käyttäjien oireilmoitusten perusteella tarkempien tutkimusten ja selvitysten tarpeellisuutta. Työnantajan vastuulla on selvittää myös mahdollisten muiden kuin rakennuksesta johtuvien häiritsevien tekijöiden vaikutusta koettuun sisäilmaston laatuun [6].

4. Selvitykset

4.1 Tutkimukset sisäilmaston laadun parantamiseksi

Tilaaja päättää kuntotutkimusten tilaamisesta, tai tarvittaessa päätös tehdään yhteistyössä sisäilmaryhmän kanssa. Tilaaja laatii kuntotutkimusten tarjouspyynnön ja vastaa lähtötietoineiston kokoamisesta. Puutteelliset lähtötiedot heikentävät kuntotutkimusten lopputuloksen laatua.

Tilaaja määrittää tutkimusten tavoitteet, jotka perustuvat rakennuksen tiedossa oleviin käyttöikä- ja elinkaaritavoitteisiin. Tilaaja vastaa, että valitut kuntotutkijat ovat riittävän päteviä rakennuksen erityispiirteet huomioiden. Tutkimustarjoukset voivat poiketa toisistaan merkittävästi sekä sisällöllisesti että kustannuksiltaan ja tilaajan on suositeltavaa hyödyntää asiantuntijaa tarjouspyynnön laadinnassa, tarjousten ja tekijöiden pätevyyden arvioinnissa ja sopimusten laadinnassa. Isommissa hankkeissa, joissa tilaajalla on mukana johtava asiantuntija, on tämän osaamisen hyödyntäminen järkevää.

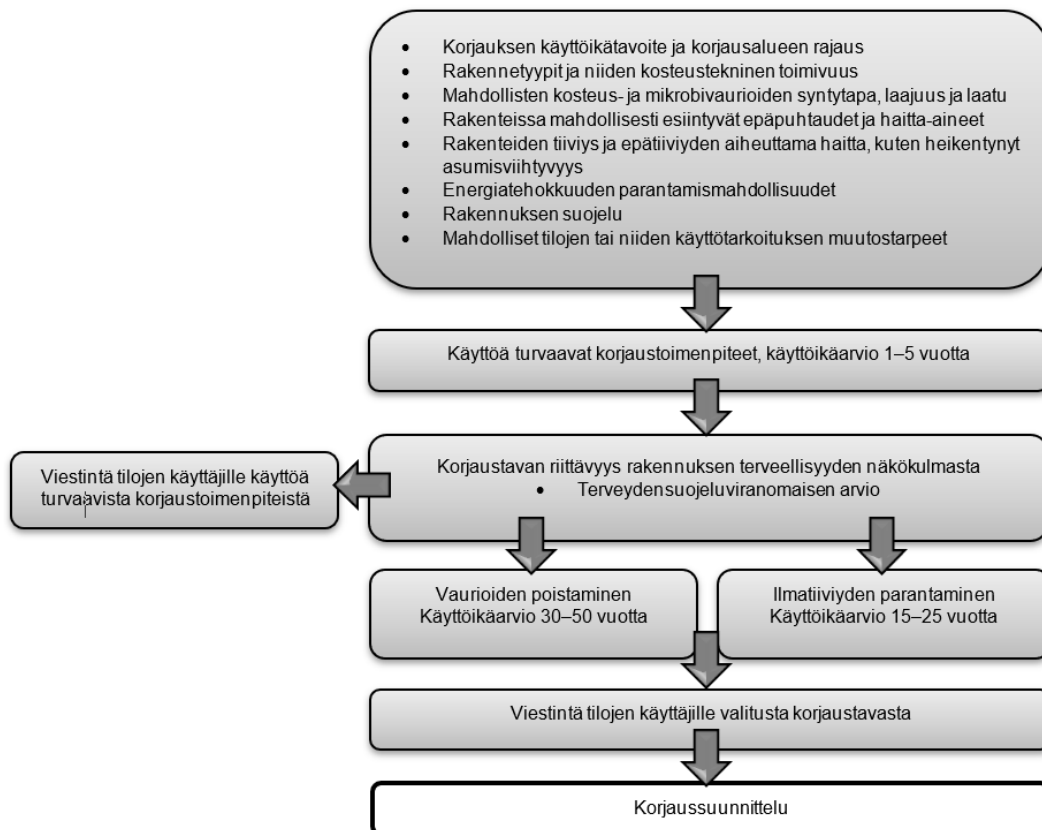
Tilaaja vastaa tutkimusten ohjauksesta sekä sopimuksen mukaisuudesta. Tilaaja tarkastaa ja hyväksyy kuntotutkijoiden laatimat tutkimussuunnitelmat sekä -raportit yhteistyössä sisäilmaryhmän kanssa. Riittävän kattavan ja syy-seuraussuhteen selvittämiseen keskittyvän kuntotutkimuksen perusteella korjaussuunnittelijan on mahdollista määrittää soveltuvia korjausvaihtoehtoja. Tilaaja valitsee lopullisen korjaustavan suunnittelijan esittämistä vaihtoehdoista.

Työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien terveydellistä merkitystä arvioi sisäilmaryhmässä työterveyshuollon asiantuntija. Asuntojen sekä julkisten rakennusten terveyshaitan ja tilojen käytettävyyden arviointi kuuluu terveydensuojeluviranomaiselle. Tilaaja ohjaa sisäilmaryhmässä viestintäsuunnitelman laatimista, ohjaa kuntotutkimussuunnitelman laatimista ja vastaa kuntotutkimustulosten sekä korjaavien toimenpiteiden tiedottamisesta tilojen käyttäjille. Tilaaja myös välittää kuntotutkimustulokset työterveyshuollolle ja terveydensuojeluviranomaiselle.

4.2 Korjaustavan valinta

Korjausten ensisijaisena tavoitteena on poistaa kosteus- ja mikrobivaurioista ja/tai muista sisäilman epäpuhtauksista aiheutuva haitta sisäilman laadulle. Tilaaja määrittää korjaussuunnittelulle rakennuksen käyttöikätaavoitteen, jonka perusteella korjaussuunnittelija määrittää tapauskohtaisesti soveltuvia korjausvaihtoehtoja [8,9].

Eri korjausvaihtoehtoista tilaaja valitsee rakennuksen suunnitellulle elinkaarelle soveltuvimman korjausvaihtoehdon ja päättää käytettävistä korjaustavoista ja korjausten laajuudesta yhteistyössä sisäilmaryhmän tai kohteeseen perustetun hankesuunnitteluryhmän kanssa. Tilaaja vastaa korjaustavan ja laajuuden tiedottamisesta tilojen käyttäjille.



Kuva 2. Rakennuksen korjaustavan valintaan vaikuttavat tekijät, kun huomioidaan rakennukselle suunniteltu käyttöikä, rakennuksen terveellisyys ja käytettävyys.

4.3 Rakennuttajakonsultin rooli sisäilmasto-ongelman ratkaisemisessa

Tilaaajan kannattaa viimeistään tutkimusten toteuttamisen ja korjaustavan valinnan jälkeen päättää, valitseeko ulkopuolisen rakennuttajakonsultin avukseen vai hoitaako tilaaja rakennuttamisen itse. Rakennuttajakonsultti on tilaaajan edunvalvoja, joten rakennuttajakonsultin olisi hyvä olla urakoitsijasta riippumaton henkilö.

Tilaaja (tai rakennuttajakonsultti yhdessä tilaaajan kanssa) varmistaa, että rakennushankkeen johtamisen ja rakennuttamisen tehtävät sekä rakennushankkeeseen ryhtyvän velvollisuudet ja vastuut tulevat suoritetuiksi. Isoissa ja monimutkaisissa korjauksissa ja tilaaajan vastuiden lisääntyessä on ulkopuolisen rakennuttajakonsultin palkkaaminen kannattavaa etenkin, jos tilaaja ei ole rakennusalan ammattilainen.

Tilaaajan tehtäviä sisäilmasto-ongelman ratkaisemisessa, joissa rakennuttajakonsultti voi muun muassa auttaa, ovat:

- korjausten laajuus- ja laatutavoitteiden sekä aikataulun ja toteutusmuodon määrittäminen
- suunnittelun valmistelun ja ohjauksen tehtävät
- rakentamisen valmisteluvaiheen tehtävät sekä turvallisuuteen liittyvien lakisääteisten velvoitteiden hoitaminen
- rakentamisvaiheen tehtävät sekä tarvittaessa vastaanotto- ja takuuvaiheen tehtävät.

5. Korjaavat toimenpiteet

5.1 Korjaussuunnittelu

Sisäilmasto-ongelmaa poistettaessa vaikutetaan rakennuksen käyttäjien terveydellisiin oloihin, jolloin voidaan tarvita rakennuslupa. Tilaaja selvittää rakennuslupan tarpeellisuuden ja sitä kautta pääsuunnittelijan tarpeellisuuden. Tilaaja määrittelee korjaustyön toteutusmuodon, huolehtii rakennuttajalle kuuluvien lakisääteisten tehtävien hoitamisesta sekä laatii korjaushanketta varten suunnittelu- tai projektiohjelman sekä suunnittelualakohtaisiin tehtäväluetteluihin pohjautuvat suunnittelutarjouspyynnöt. Tilaajan on huolehdittava siitä, että suunnitteluun valitaan riittävän pätevyyden omaavat suunnittelijat korjausten sisältö ja vaativuusluokka huomioon ottaen.

Saaduista tarjouksista tilaajaa valitsee kokonaisuuden kannalta sopivimmat suunnittelijat ja asiantuntijat. Korjaushankkeen kosteudenhallintakoordinaattori ja puhtaudenhallinta-asiantuntija on suositeltavaa valita viimeistään korjaushankkeen toteutussuunnitteluvaiheessa. Tilaaja toimittaa valituille suunnittelijoille tarvittavat suunnitelma-asiakirjat sekä ohjaa suunnittelua. Tilaaja organisoii tiedottamisen korjaussuunnittelun etenemisestä tilojen käyttäjille sekä hyväksyy toteutussuunnitelmat.

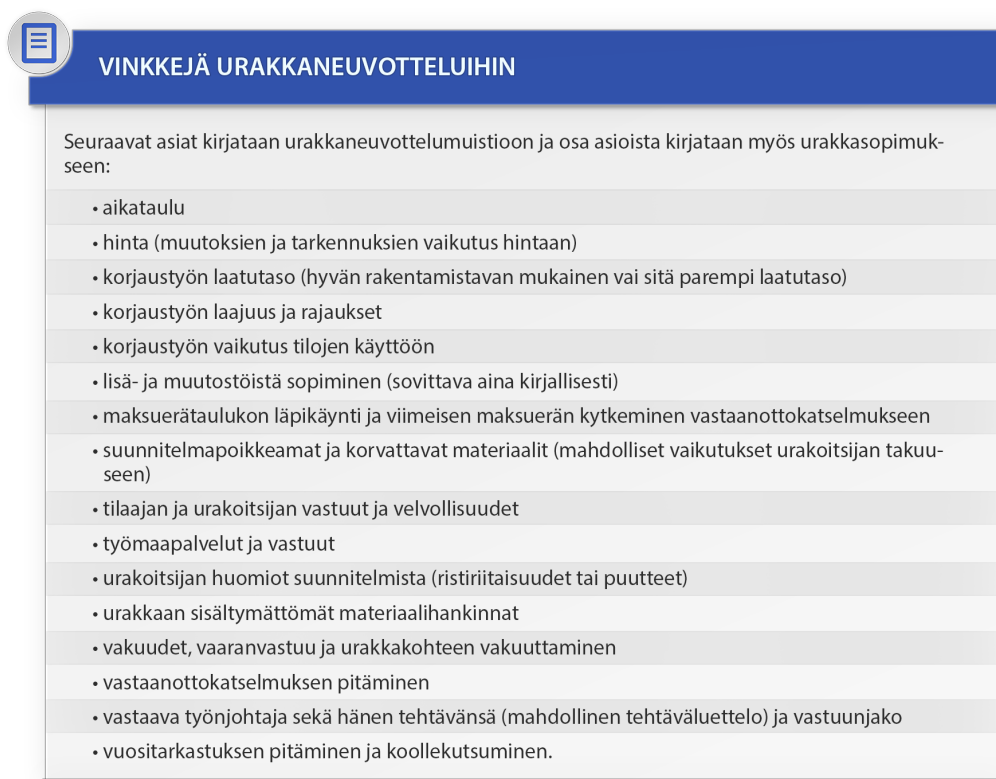
Käytännön korjaustyöt tehdään edellä laadittujen ja urakkasopimukseen liitettyjen suunnitelmien mukaan. Korjaussuunnitelmien laatu ja tavoitteiden mukaisuus ovat erittäin tärkeä osa sisäilmasto-ongelman ratkaisemista ja korjausten onnistumista, koska urakoitsija vastaa sopimuksen ja hyvän rakentamistavan mukaisesta työn toteuttamisesta. Urakoitsija ei vastaa, jos rakennuksen sisäilmasto-ongelma ei ratkea tilaajan vastuulla olevien korjaussuunnitelmien mukaisilla toimenpiteillä.

5.2 Purku- ja korjaustyö

Suunnitelmien laadinnan ja hyväksymisen jälkeen käynnistyy rakentamisen (purku- ja korjaustyö) valmistelu. Urakkatarjouspyyntövaiheessa tilaajan tehtäviin kuuluu urakka- ja hankintarajojen määrittely ja kaupallisten urakka-asiakirjojen laadinta, teknisten urakka-asiakirjojen kokoaminen, rakennuttajan turvallisuusasiakirjan laadinta sekä turvallisuuskoordinaattorin nimeäminen.

Tilaajan tulee nimittää jokaiseen rakennushankkeeseen sen vaativuutta vastaava pätevä turvallisuuskoordinaattori sekä päätoteuttaja [5]. Tämä koskee myös hankkeita, joihin ei vaadita rakennuslupaa. Jos hankkeelle ei ole nimetty turvallisuuskoordinaattoria eikä päätoteuttajaa, vastaa tilaaja itse heille kuuluvista lainsäädännön mukaisista velvoitteista. Käytännön rakennustyötä johtava ja työn suoritusta valvova vastaava työnjohtaja tulee nimetä aina rakennuslupan alaisissa töissä sekä usein turvallisuus- ja terveellisyysnäkökohtien takia myös sisäilmastokorjauksissa. Edellä esitettyjen roolien tarve tulee huomioida tarjouspyyntöjen laadinnassa.

Sisäilmastokorjausten onnistumisen kannalta urakkasopimusta edeltävät sopimusneuvottelut (urakkaneuvottelu) ovat erittäin tärkeitä. Urakkaneuvotteluissa tilaajalla on mahdollisuus pyytää urakoitsijaa tarkentamaan tarjouksensa sisältöä, laajuutta ja kustannusten muodostumista. Urakkaneuvotteluissa käydään läpi myös tilaajan ja urakoitsijan vastuuta ja velvollisuuksia sekä mahdollista maksuerätaulukkoa, jonka sisältöön tilaajalla on oikeus ja valta vaikuttaa. Urakkaneuvottelun muistio on tyypillisesti yksi (kirjallisen) urakkasopimuksen asiakirjoista ja siihen voidaan vedota mahdollisissa riitatapauksissa.



VINKKEJÄ URAKKANEUVOTTELUIHIN

Seuraavat asiat kirjataan urakkaneuvottelumuistioon ja osa asioista kirjataan myös urakkasopimukseen:

- aikataulu
- hinta (muutoksien ja tarkennuksien vaikutus hintaan)
- korjaustyön laatu (hyvän rakentamistavan mukainen vai sitä parempi laatu)
- korjaustyön laajuus ja rajaukset
- korjaustyön vaikutus tilojen käyttöön
- lisä- ja muutostöistä sopiminen (sovittava aina kirjallisesti)
- maksuerätaulukon läpikäynti ja viimeisen maksuerän kytkeminen vastaanottokatselmukseen
- suunnitelmapoikkeamat ja korvattavat materiaalit (mahdolliset vaikutukset urakoitsijan takuuseen)
- tilaajan ja urakoitsijan vastuut ja velvollisuudet
- työmaapalvelut ja vastuut
- urakoitsijan huomiot suunnitelmista (ristiriitaisuudet tai puutteet)
- urakkaan sisältyvät materiaalihankinnat
- vakuudet, vaaranvastuu ja urakkakohteen vakuuttaminen
- vastaanottokatselmuksen pitäminen
- vastaava työnjohtaja sekä hänen tehtävänsä (mahdollinen tehtäväluettelo) ja vastuunjako
- vuositarkastuksen pitäminen ja koollekutsuminen.

Kuva 3. Vinkkejä tilaajalle urakkaneuvotteluihin.

Urakkasopimuksen allekirjoituksen jälkeen korjaustyöt voidaan aloittaa, jos muut edellytykset täyttyvät (esim. rakennuslupa on lainvoimainen, avainhenkilöt on hyväksytty rakennusvalvonnassa sekä aloituskokous on pidetty tai aloittamisilmoitus on tehty). Tilaaja hyväksyy valitun urakoitsijan (pää toteuttaja) laatimat työmaatoteutusta koskevat suunnitelmat, kuten kosteuden- ja puhtaudenhallintasuunnitelmat sekä yleisaikataulun. Tilaaja varmistaa, että pää toteuttaja on tehnyt tarvittavan ennakoilmoituksen työsuojeluviranomaiselle.

Tilaajan valitsevat työmaavalvoja ja korjaussuunnittelija tarkastavat ja hyväksyvät mallityöt sekä laadunvarmistuskokeiden ja -mittausten tulokset. Tilaajan edustajana toimiva kosteudenhallintakoordinaattori valvoo ja ohjaa rakennushankkeen kosteudenhallinnan toteutusta. Puhtaudenhallinta-asiantuntija valvoo ja ohjaa rakennushankkeen pölyntorjunnan ja puhtaudenhallinnan toteuttamista tilaajan edustajana. Urakoitsija tiedottaa rakennuksen käyttäjille korjaustöiden vaikutuksesta käyttäjien toimintaan ja arvioi yhdessä tilaajan kanssa korjausalueen viereisten tilojen käyttömahdollisuuksia.

Tilaajan velvollisuutena on varmistaa, että tarvittavat maankäyttö- ja rakennuslain, rakennusluvan ja sopimuksen edellyttämät toimet tulevat korjaustyössä suoritetuiksi. Korjaustyön toteutuksen aikana tilaajan edustajat (tai tilaaja itse) seuraavat hankkeen etenemistä, valvovat aikataulujen

toteutumista ja maksuliikennettä, pitävät yhteyttä suunnittelijaan ja urakoitsijaan sekä seuraavat turvallisuusasioiden toteutumista.

Rakennushanke päättyy urakan vastaanottoon ja rakennuksen käyttöönottoon. Rakennuksen käyttöönottovaiheessa tilojen käyttäjiä opastetaan tilojen oikeaan käyttöön ja kiinteistöhuoltoa opastetaan rakennuksen ylläpitoon. Rakennuksen ja sen taloteknisten järjestelmien käytön sekä huollon opastus kuuluu urakoitsijalle.

Vastaanottokatselmuksessa/-tarkastuksessa tilaajalla on mahdollisuus varmistaa eri alojen urakoihin kuuluvien töiden sopimuksen mukaisuus. Vastaanottokatselmuksen/-tarkastuksen pitäminen ei ole pakollista, mutta se on tilaajan etujen mukaista. Rakennusluvan alaisissa korjauksissa tilaajan tulee vastaanottovaiheessa huolehtia, että viranomaisvelvoitteet on täytetty. Tilaajan tulee myös huolehtia, että urakoitsija luovuttaa vastaanoton yhteydessä urakkaa koskevat asiakirjat, kuten tiedot tuotetakuista sekä käyttö- ja huolto-ohjeet.

6. Seuranta

Korjaushankkeen vastaanottotarkastuksessa mahdollisesti havaittujen puutteiden korjausten jälkeen alkaa urakan takuu-aika. Korjaustyön takuu-aika ja takuu määräytyvät sen mukaan, mitä urakkasopimuksessa on sovittu. Tilaajan on hyvä huomioida, että urakoitsija antaa takuun sille, että työn tulos kestää sopimuksen mukaisen takuuajan suunnitelmien mukaisella laadulla. Suunnittelusopimuksien ollessa tilaajan nimissä ei urakoitsija tyypillisesti anna takuuta sille, että mahdollinen sisäilmaongelma poistuu tehdyillä korjauksilla.

Takuu-aikana seurataan rakennuksen toimivuutta, tehdään takuuajan säädöt, pidetään tarvittavat tarkastukset ja korjataan mahdolliset puutteet. Tilaajan tehtävänä on huolehtia korjausurakan takuuajan tehtävistä. Tilojen käytön aikana tilaajan tulee varmistaa, että suunnitteluvaiheessa laadittujen seurantasuunnitelmien mukaiset katselmuksot ja mittaukset on tehty sekä tiedottaa tilojen käyttäjiä selvitysten tuloksista. Seurantajakson päätyttyä tilaaja arvioi tilojen käytön aikana tehtävien katselmusten ja mittauksien jatkamisesta sekä huolehtii rakennuksen suunnitelmallisesta ja pitkäjänteisestä ylläpidosta.

7. Yhteenveto

Rakennuksen normaaleihin ylläpitotoimiin kuuluu tilaajan organisoimat haitta- tai poikkeamailmoitusjärjestelmän ylläpitäminen sekä ilmoituksiin liittyvät kiinteistöhuollon toimenpiteet. Tarvittaessa sisäilmasto-ongelman aiheuttajaa selvitetään tarkemmilla kuntotutkimuksilla ja tilannetta arvioidaan moniammatillisessa sisäilmaryhmässä. Tilaaja perustaa tarvittaessa sisäilmaryhmän sekä vastaa tarvittavien tutkimusten laajuuden määrittämisestä, tilaamisesta sekä tutkimusten ohjaamisesta.

Tilaaja hyväksyy ja tarkastaa yhdessä sisäilmaryhmän kanssa tutkimuksiin liittyvät tutkimussuunnitelmat sekä tutkimusten perusteella tehdyt johtopäätökset ja korjaustoimenpidesuositukset. Tilaaja määrittää korjauksille tavoiteltavan käyttöiän sekä valitsee rakennukselle soveltuvan korjaustavan korjaussuunnittelijan esittämistä vaihtoehdoista. Tilaaja vastaa ongelman selvitysvaiheen aikana tehtävästä tiedottamisesta tilojen käyttäjille ja niiden sidosryhmille.

Tilaaja hankkii korjaushankkeelle tarvittaessa rakennusluvan, vastaa suunnittelun tavoitteiden ja laajuuden määrittämisestä ja siitä, että suunnittelun lähtötiedot on selvitetty riittävällä

tarkkuudella ja laajuudella. Tilaaja vastaa, että suunnittelu on tehty kelpoisuusvaatimukset täyttävien suunnittelijoiden toimesta, ja että rakennuslupaa vaativissa korjauksissa on nimetty pääsuunnittelija. Tilaaja vastaa myös suunnittelun ohjauksesta, hyväksyy laaditut toteutus suunnitelmat ja laadunvarmistusasiakirjat ja käynnistää rakentamisen valmistelun.

Tilaajan tehtäviin kuuluu korjausvaiheessa mm. urakkamuodon valinta, urakka- ja hankintarajojen sekä laatutavoitteiden määrittely, hankinta-asiakirjojen valmistelu ja kokoaminen sekä turvallisuusvelvoitteista huolehtiminen. Tilaaja huolehtii, että sopimusneuvottelut pidetään ja kirjalliset sopimukset laaditaan valitsemansa urakoitsijan kanssa. Tilaaja myös huolehtii, että päätoteuttaja ja vastaava työnjohtaja tulee nimettyä.

Tilaaja varmistaa sopimuksen mukaisen toteutuksen ja tavoitteet täyttävän lopputuloksen yhteistyössä ulkopuolisten valvojien ja asiantuntijoiden kanssa. Tilaaja tarkistaa rakentamis- ja vastaanottovaiheessa korjaustöiden suunnitelmien mukaisuuden ja toimivuuden.

Tilaaja huolehtii korjausurakan takuuaajan tehtävistä valitun sopimusmuodon ja -ehtojen mukaisesti. Tilaaja vastaa korjaukselle laaditun seurantasuunnitelman toteuttamisesta sekä rakennuksen suunnitelmallisesta yllä- ja kunnossapidosta. Tilaaja vastaa korjaushankkeen aikaisesta tiedottamisesta tilojen käyttäjille.

Sisäilmasto-ongelman selvitys ja korjausvaiheessa tilaajan edustajana ja edunvalvojana voi toimia ulkopuolisia asiantuntijoita, kuten selvitysvaiheessa johtava asiantuntija ja suunnittelu-, purku- ja korjaustyövaiheessa rakennuttajakonsultti.

Lähdeluettelo

- [1] Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999).
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L17P120d>
- [2] Laki tilaajan selvitysvelvollisuudesta ja vastuusta ulkopuolista työvoimaa käytettäessä (1233/2006). <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20061233>
- [3] Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015).
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150798>
- [4] Valtioneuvoston asetus työhön liittyvän syöpävaaran torjunnasta (1267/2019).
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20191267>
- [5] Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009).
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090205>
- [6] Työterveyslaitos, 2022. Terveydellisen merkityksen arviointi sisäilmatilanteissa.
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-047-8>
- [7] Työterveyslaitos, 2023. Sisäilmastoselvitys ja olosuhtearviointi: Ohje työpaikkojen sisäilmastoselvityksiä ja olosuhtearviointeja tekeville. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-037-9>
- [8] Ympäristöministeriö, 2019. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18, Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-024-8>
- [9] Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017). Tulostettavissa: www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782

JUKO-ohjeistokansion päivitys

Stina Hyyrynen^{1,2}, Jukka Lahdensivu³, Niko Lindman³ ja Toni Pakkala³

¹ Julkisivuyhdistys – JSY ry

² A-Insinöörit Suunnittelu Oy

³ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakenteiden korjaaminen ja elinkaaritekniikka

Tiivistelmä

Julkisivujen korjaamiseen on viime vuosina tullut uusia tai päivitettyjä oppaita. Lisäksi alalla käytettävät korjausmenetelmät ovat päivittyneet joiltakin osin. Tämän myötä myös Julkisivuyhdistys – JSY ry:n tuottama JUKO-ohjeistokansioon on tullut päivitystarvetta. Tässä artikkelissa kerrotaan JUKO-ohjeistokansion keskeisestä sisällöstä sekä päivitystyöstä. JUKO-ohjeistokansiossa käydään läpi julkisivurakenteiden korjaushankkeen läpivientiä erityisesti taloyhtiön näkökulmasta. Ohjeistokansioon kuuluvissa suunnitteluohjeissa käsitellään rakenneosittain erilaisia julkisivurakenteiden korjaustapoja.

1. Johdanto

JUKO-ohjeistokansio [1] on Julkisivuyhdistys - JSY ry:n kotisivuilla julkaistu laaja, vapaasti saatavilla oleva ohjeistus julkisivukorjausten läpivientiä varten. Ohjeistokansio kattaa koko korjaushankkeen, sisältäen muun muassa tyypillisen julkisivukorjaushankkeen kuvauksen asunto-osakeyhtiön näkökulmasta. Ohjeistossa käydään läpi korjaushankkeen läpivienti hanke- ja korjaussuunnittelun kautta rakentamisvaiheeseen ja rakennuksen ylläpitoon. Korjaustavat-osiossa käydään läpi eri julkisivurakenteiden, parvekkeiden ja ikkunoiden korjaaminen. Aineisto on suunnattu mm. oppilaitoksille, isännöintitoimistoille ja julkisivukorjausten suunnittelijoille.

Aikaisempi ohjeistokansio on toteutettu vuosina 2005–2006 ja siten materiaali on osin vanhentunutta sekä puutteellista. Tässä artikkelissa kerrotaan ohjeistokansion päivitystyöstä sekä ohjeistokansion keskeisestä sisällöstä. JUKO-ohjeistokansio on päivitetty ajan tasalle ja siihen on lisätty uusia korjausmenetelmiä ja muuta uutta / ajantasaista, korjaushankkeen kannalta tärkeää tietoa.

Julkaisun kirjoitustyö on tehty Tampereen yliopistolla. Kirjoitustyöhön osallistuivat TkT Toni Pakkala, TkT Jukka Lahdensivu ja DI Niko Lindman. Julkisivuyhdistyksen hallituksen puheenjohtaja Stina Hyyrynen koordinoi hanketta. Hankkeen ohjausryhmä on koottu osallistuvien yritysten ja Tampereen Yliopiston edustajista sekä muista ulkopuolisista asiantuntijajäsenistä. Kaikkiaan päivitystyössä oli mukana 18 yritystä tai yhteisöä. Ohjausryhmä on jaettu pienryhmiin, joista jokainen vastasi tietyn osion ohjauksesta. Hanke käynnistyi loppuvuonna 2022 ja kesti syksyyn 2023.

JUKO-ohjeistokansion tarkistus ja täydentäminen uusilla ja merkittävästi päivitettävillä osioilla on saanut tukea ympäristöministeriöltä Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä (RRF) (30 %). Päivitystyöhön on myönnetty rahoitusta myös Rakennustuotteiden Laatu Säätöiltä (30 %). Jäljelle jäävä osuus (40 %) jaettiin päivitystyöhön osallistuvien yritysten sekä Julkisivuyhdistyksen kesken.

2. JUKO-ohjeistokansion sisältö

Julkisivuyhdistys – JSY ry on edistänyt kestävästä julkisivurakentamisesta jo vuodesta 1995 asti. Yhtenä tärkeänä tehtävänä on teettää julkisivuihin liittyvää tutkimusta ja laatia ohjeistuksia. JUKO-ohjeistokansio on yksi Julkisivuyhdistyksen keskeisistä oppaista.

JUKO-ohjeistokansio jakautuu kahteen osioon: Korjaushankkeen läpiviintiin ja korjaustapoihin. Ensimmäisessä osiossa käydään läpi korjaushankkeen eri vaiheet suunnittelusta toteutukseen kuntotutkimusta unohtamatta. Osiossa käsitellään sekä rakennuksen että korjauksen ylläpitoa. Toisessa osiossa käsitellään eri julkisivurakenteiden (ulkoseinien, parvekkeiden sekä ikkunoiden) korjaustavat materiaaleittain. Korjaustavoissa käydään läpi sekä kevyempiä että raskaampia korjausvaihtoehtoja ja niissä huomioitavia seikkoja. Tietoaineistoon liittyy myös Excel-pohjainen elinkaarikustannuslaskentaohjelma, joka on lähinnä lisälämmöneristyskorjausten elinkaarikustannusten arvioinnin apuna käytettävä työkalu. Laskentaohjelma ei ole tämän päivivityksen kohteena.

JUKO OHJEISTOKANSIO

A RAKENNUKSEN YLLÄPITO	B HANKE-SUUNNITTELU	C KORJAUS-SUUNNITTELU	D RAKENTAMIS-VAIHE	E KORJATUN RAKENTEEN YLLÄPITO
A1 Kiinteistönpidon strategiat	B1 Korjaushankkeen osapuolet	C1 Suunnittelun valmistelu	D1 Rakennusvaiheen organisaatio, urakamuodot ja toteutus	E1 Julkisivukorjauksen käyttö ja huolto-ohje
A2 Korjaushanke asunto-osakeyhtiössä	B2 Rakenteet ja korjausmahdollisuudet	C2 Suunnittelun ohjaus	D2 Korjausurakan vastaanotto	
A3 Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje	B3 Korjaustarpeen selvittäminen ja kuntotutkimukset			
	B4 Korjaustavan valinta			
	B5 Rahoitustarkastelut			
	B6 Viranomaisohjaus julkisivukorjaushankkeessa			

KORJAUSTAPAKUVAUKSET

Yleiskuvaukset
Suunnitteluohjeet

ELIKAARIKUSTANNUSLASKENTA-OHJELMA JUKO.xls

Investointikustannukset
Elinkaarikustannusten vertailu

Kuva 1. JUKO-ohjeistokansion rakenne.

Päivitystarvetta on ollut niin korjaushankkeen läpiviennin osiossa kuin korjaustavoissakin. Uusia korjausmenetelmiä ja -materiaaleja on lisätty, esitettyihin menetelmiin on tehty tarkennuksia ja parannuksia sekä toimimattomiksi tai kannattamattomiksi todettuja ratkaisuja on karsittu. Hankkeen yhteydessä vanha materiaali on käyty läpi kauttaaltaan ja ohjeistokansioon on liitetty

uusina tai merkittävästi päivitettävänä osioina mm:

- purkamisen, täydennysrakentamisen ja korjaamisen välisen valintaprosessin kuvaus
- puujulkisivujen korjaus- ja kunnostusmenetelmät sekä soveltuvuus ja sen kriteerit verhoukorkorjauksissa tai tuulettuvien levyjulkisivujen uusimisessa
- eristerappausjärjestelmien korjausmenetelmät
- lisälämmöneristysten ja julkisivurakenteen lämmöneristävyuden parantamisen energiansäästöpotentiaali

Kokonaan uutena asiana ohjeistokansioon on lisätty omana osionaan yleistä tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista tulevaisuudessa rakenteiden vaurioitumiseen sekä millä menetelmillä niihin voidaan sopeutua. Tavoitteena on kasvattaa alan tietoutta muun muassa uusiutuvista materiaaleista sekä korjausrakentamisen vaikutuksista hiilijalanjälkeen yleisesti. Osiossa käsitellään asioita myös rakenteiden elinkaaren kannalta ja korjausrakentamista osana kiertotaloutta.

2.1 Korjaushankkeen läpivienti

Korjaushankkeen läpivienti on esitetty JUKO-ohjeistokansiossa erityisesti taloyhtiön näkökulmasta. Osiossa tuodaan esille eri kiinteistönpidon strategioita ja tyypillisen julkisivukorjaushankkeen läpivientiä kuntotutkimuksista suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon.

Tyypillinen julkisivurakenteiden korjaushanke käynnistyy kuntotutkimuksella. Korjaushankkeen läpiviennin kannalta on oleellista selvittää rakenteen kunto kuntotutkimuksen avulla. Suositeltavaa on tehdä kuntotutkimus jo ennen näkyviä vaurioita, jolloin rakenteiden käyttöikä voidaan pidentää suojaavilla toimenpiteillä. Kuntotutkimuksen jälkeen voidaan käynnistää hankesuunnittelu, jossa selvitetään eri korjausvaihtoehdot sekä niiden soveltuvuus ja ominaisuudet päätöksenteon tueksi. Korjaustavan soveltuvuuteen vaikuttavat muun muassa vauriotilanne, käytetyt rakenteet ja materiaalit sekä niiden yksityiskohdat, rakennuksen muut ominaisuudet sekä ulkoiset rasitustekijät [1]. Lisäksi soveltuvuuteen vaikuttavat ulkonäölliset seikat, arkkitehtuuri ja kustannukset [1]. Soveltuveden lisäksi korjaustavan valintaan voivat vaikuttaa myös korjauksen pitkäaikaiskestävyys ja muut kestävän kehityksen näkökulmat. Näitä kaikkia osioita käydään läpi ohjeistokansiossa. Hankesuunnittelun osalta ohjeistokansiossa käsitellään eri korjaustapojen vaihtoehtojen kustannustasoa, pitkäaikaiskestävyyttä sekä soveltuvuutta eri vaurioasteisiin. Korjaussuunnittelun, rakentamisen ja ylläpidon osalta ohjeistokansiossa tuodaan esille erityisesti tilaajalta vaadittavat toimenpiteet näissä vaiheissa.

Uutena osiona korjaushankkeen läpivienti -osioon tuodaan ilmastonmuutokseen sopeutumisen ja kestävän kehityksen näkökulmia. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat kasvavat saderasitukset ja viistosateen määrä rasittavat erityisesti julkisivurakenteita. Siksi korjauksiin ja suunnitteluun tulee tulevaisuudessa kiinnittää entistä enemmän huomiota, erityisesti yksityiskohtien ja laadunvarmistuksen osalta. Lisäksi päivityksen myötä on tarkennettu rahoitustarkasteluja, viranomaisohjauksen kirjauksia sekä nykyään käytössä olevia urakkamuotoja.

2.2 Korjaustavat

Toisessa osiossa käsitellään eri julkisivurakenteiden, parvekkeiden ja ikkunoiden korjaustavat rakenneosittain ja materiaaleittain. Korjaustavat on jaoteltu säilyttäviin pinnoitus- ja paikkauskorjauksiin, verhoaviin korjauksiin ja kokonaan tai osittain purkaviin korjauksiin. Kussakin osiossa on esitetty kyseisen rakenneosan korjaustavan yleiskuvaus sekä

suunnitteluohjeet. Yleiskuvauksessa esitellään rakenteen toimintaa yleisesti ja tuodaan esille korjaustavan valintaan vaikuttavia tekijöitä ja korjauksen soveltuvuutta eri tilanteisiin. Suunnitteluohjeissa tuodaan esille korjaustavassa huomioitavat asiat, korjaustyön eri vaiheet sekä laadunvarmistukseen liittyvät asiat.

Betonisten, rapattujen, muurattujen ja levytettyjen julkisivujen korjaustapojen lisäksi uusina osioina on tuotu eristerappausten ja puujulkisivujen korjaustavat. Päivityksessä on tuotu tarkemmin esille laadunvarmistukseen liittyviä tekijöitä sekä listattu yleisesti korjaustavassa tarvittavat suunnitelmat. Myös haitallisten aineiden osalta on tehty tarkennuksia päivitysneiden ohjeistusten ja raja-arvojen myötä. Ohjeeseen on päivitetty lisäksi tietoa betonin alkalikiviainesreaktiosta, akustiikan huomioimisesta sekä paloturvallisuudesta.

2.2.1 Betonijulkisivut ja parvekkeet

Betonisandwich-rakenne, joka koostuu betonisesta sisä- ja ulkokuoresta sekä niiden välisestä lämmöneristekerroksesta, on tyypillisin ulkoseinärakenne Suomen kerrostalokannassa. Myös kuorielementtejä käytetään ulkoseinärakenteena. Nämä betonijulkisivun perusrakenteet ovat pysyneet melko samoina elementtitekniikan kehittymisestä huolimatta. Elementtitekniikka yleistyi 1960–1970-luvuilla. Betonielementeillä on useita pintavaihtoehtoja muun muassa maalattu tai maalaamaton betoni, väri- ja valkobetoni, pesubetoni, klinkkerilaatat ja tiililaatat. [1]

Betonijulkisivujen osio on ohjeistokansion laajin osuus. Betonijulkisivuista on käsitelty laastipaikkaus- ja pinnoituskorjaus, erilaiset verhouskorjaukset eri materiaaleilla tai järjestelmillä sekä purkava korjaus. Betoniparvekkeet on myös käsitelty omassa osiossaan, vaikka niiden korjaustavat ovat pitkälti vastaavat kuin betonijulkisivuilla. JUKO-ohjeistokansiossa on tuotu esille lisäksi erilaisia parveketyyppejä ja niiden tyypillisiä korjaustapoja.

Betoni osion suurimmat muutokset liittyvät uusien standardien ja ohjeistusten päivittämiseen. Ohjeistokansioon on tuotu muun muassa oppaiden by 57 Eriste- ja levyrappaus 2016 [2], by 64 Tuulettuvat julkisivut 2021 [3] sekä by 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016 [4] uudet ja päivitetty tiedot. Eniten uudistuksia on tehty verhouskorjauksista eristerappaukseen. Pinnoitus- ja paikkauskorjausten suunnitteluohjeeseen on tarkennettu saumausten uusintaa nykyisten käytäntöjen mukaiseksi ja uutena korjaustapana on lisätty halkeamien korjaus.

2.2.2 Rapatut ja muuratut julkisivut

Rapattuja julkisivuja on käytetty tyypillisesti aina 1960-luvulle asti asuinrakennuksissa. Periaatteet ja materiaalit ovat pysyneet pitkään pääosin samoina. Uudempana rakenteena on tullut eristerappaus. Alustarakenteena on tyypillisesti tiilimuuraus, mutta myös harkkorakenteita on käytetty ja eristerappauksessa lämmöneristettä. [1]

Ennen 1950-lukua muuratun julkisivun ulkoseinärakenne oli pääosin massiivitiilimuuri. Tämän jälkeen myös kuorimuurirakenteet yleistyivät. Myös erilaiset harkkorakenteet kuuluvat muurattuihin rakenteisiin. [1]

Rapattujen ja muurattujen rakenteiden osalta päivityksessä on tarkennettu erityisesti laadunvarmistusta, kosteusteknisen toiminnan parantamista, rappauksen verkotusta ja heikoille alustoille (esim. kevytbetoni) tehtyjen rappauksen erityispiirteitä.

Aiemmassa JUKO-ohjeistokansiossa eristerappausta on käsitelty ainoastaan betonijulkisivun

verhoavana korjauksena. 2000-luvulla eristerappaus on yleistynyt myös uudistuotannossa ja lisäksi ensimmäiset eristerappauksella korjatut kohteet ovat tulleet korjausikään.

Julkisivuyhdistys on teettänyt useita hankkeita eristerappauksiin liittyen, joista yksi on käsitellyt eristerappauksen vaurioitumista ja kuntotutkimusmenetelmiä [5] ja toinen eristerappauksen korjausmenetelmiä [6]. Nämä tiedot haluttiin tuoda uuteen päivitettyyn JUKO-ohjeistokansioon. Ohjeistokansioon on siten lisätty sekä ohutrappaus- että paksurappaus-eristejärjestelmän paikka- ja pinnoituskorjausten suunnitteluohjeet. Muita eristerappauksen korjausmenetelmiä on käsitelty lyhyesti yleiskuvauksessa.

2.2.3 Levyjulkisivut, ikkunat ja liittyvät rakenteet

Levyjulkisivut ovat kerroksellisia ulkoseinärakenteita, jotka koostuvat verhoulevystä, mahdollisesta tuulensuojasta, lämmöneristeestä ja rangasta sekä mahdollisesta kantavasta rungosta (esim. betoni tai muuraus). Ennen 1960- ja 70-lukua verhoulevynä on usein ollut asbestipitoinen sementtilevy. Sen jälkeen myös muut materiaalit ovat yleistyneet, muun muassa muovipinnoitetut metalliverhoukset ja -kasetit. [1]

Ohjeistokansion päivityksessä levyjulkisivujen osalta on tuotu esille muun muassa tarkentuneet määräykset energiantehokkuuden parantamisesta sekä oppaan by 64 Tuulettuvat julkisivut 2021 [3] ohjeistukset. Puuverhous on myös tuotu tarkemmin esille verhoumateriaalina. Myös tuulettuvan julkisivun alusrakenteen korjausta on tarkennettu purkavassa korjaustavassa.

JUKO-ohjeistokansiossa käsitellään myös muita julkisivurakenteita ulkoseinärakenteiden lisäksi, muun muassa ikkunoita ja liittyviä rakenteita. Näiden osalta on päivitetty nykyään käytössä olevia korjausmenetelmiä.

3. Yhteenveto

JUKO-ohjeistokansio on laaja verkkojulkaisuna toteutettu ohjeistus julkisivurakenteiden korjaamisesta. Ohjeistossa käydään läpi koko korjausprosessi. Korjaushankkeen läpivienti -osiossa on kerrottu julkisivukorjaushankkeesta kuntotutkimuksista suunnitteluun, korjaukseen ja rakennuksen ylläpitoon asti. Osio on kirjoitettu pääosin taloyhtiön näkökulmasta, mutta siitä on hyötyä myös muille kiinteistönomistajille. Korjaustavat-osiossa käsitellään eri korjausmenetelmiä suunnittelijan näkökulmasta.

Päivitystyössä ohjeistokansio on tuotu ajan tasalle päivittyneiden ohjeistusten ja oppaiden myötä. Ohjeistokansioon on myös lisätty uusia osioita muun muassa eristerappauksen paikkaus- ja pinnoituskorjauksista sekä ilmastonmuutokseen sopeutumisesta ja kestävä kehityksen huomioimisesta.

Lähdeluettelo

- [1] Haukijärvi, M., Hekkanen, M., Lahdensivu, J., Lod, T. 2005. JUKO-ohjeistokansio [verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto, VTT ja Julkisivuyhdistys. [viitattu 10.8.2023]. Saatavissa: <https://julkisivuyhdistys.fi/tietoa-julkisivuista/juko-ohjeistokansio/>
- [2] Suomen betoniyhdistys ry. 2016. by 57 Eriste- ja levyrappaus 2016. BY-Koulutus Oy. 145 s.
- [3] Suomen betoniyhdistys ry. 2021. by 64 Tuulettuvat julkisivut 2021. BY-Koulutus Oy. 141 s.
- [4] Suomen betoniyhdistys ry. 2021. by 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016. BY-Koulutus Oy. 115 s.

- [5] Lemberg, A.-M. 2019 Eristerappausjärjestelmien vauriomekanismit ja kuntotutkimusmenetelmät. Tampereen yliopisto, diplomityö. 185 s.
- [6] Eronen, M. 2020. Eristerappausjärjestelmien tyypillisten vaurioiden korjausmenetelmät. Metropolia ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö (ylempi AMK). 151 s.

B2. Laboratorio- ja kenttätutkimukset

Betonin lämpötilan vaikutus betonin suhteelliseen kosteuteen

Laura Virtanen ja Pauli Sekki
AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Betonin suhteellisen kosteuden lämpötilariippuvuus on kysymys, joka voi aiheuttaa epäselvyyttä mittaustulosten tulkinnassa. Esimerkiksi betonin suhteellisen kosteuden mittaamisen ohjeistuksessa RT103333 on esitetty mittaolosuhde-epävarmuus (T_{mo}), mutta ei ole otettu kantaa lämpötilapoikkeaman (kylmempi/lämpimämpi) vaikutuksen suuntaan. Toisaalta mittaolosuhde-epävarmuus pitää sisällään myös sanallisia määreitä, joiden vaikutusta ei käytännössä pystytä yksiselitteisesti arvioimaan. Tässä artikkelissa esitellään RTA-opinnäytetyön tulokset, jossa selvitettiin useiden eri vesisideainesuhteen betonien suhteellisen kosteuden lämpötilariippuvuutta ja ehdotetaan korjaustermiä lämpötilariippuvuuden huomioimiseksi mittaustuloksia tulkittaessa. Lisäksi lämpötilavaikutuksen merkittävyyttä havainnollistetaan esimerkkien avulla, ja esitetään miten työn tulosten avulla lämpötilavaikutuksen suuruutta ja suuntaa voidaan käytännössä arvioida. Esimerkkien perusteella havaittiin, että RT 103333 mukaisessa suosituslämpötilassa 18–25 °C korjaustermin avulla laskettu lämpötilavaikutus on kaikissa tarkastusväleissä T_{mo} :n vaihteluvälissä, mutta osin T_{mo} :ssa ei ole yhtään lämpötilavaikutuksen ulkopuolista varmuusmarginaalia. Betonin lämpötilan laskiessa mittaolosuhde-epävarmuus T_{mo} ylikorjaa mittaustuloksia merkittävästi.

1. Johdanto

Betonirakenteiden lämpötila ja lämpötilan vaihtelut ovat suhteellisen kosteuden (RH) mittausten luotettavuuden kannalta tärkeitä osatekijöitä, joiden vaikutusta mittauksen luotettavuuteen on käsitelty ohjekortissa RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittausta [1]. Ohjekortin mittaolosuhde-epävarmuus (T_{mo}) pitää sisällään kaksi tekijää: vastaako mittaushetken lämpötila tilan/rakenteen käyttötilanteen lämpötilaa ja onko lämpötilaolosuhde vakaa mittauksen aikana. Ohjeen liitteen 1 mukaan T_{mo} on välillä $\pm 1...6$ saaden pienimmän epävarmuuden mittaustilanteen vastatessa käyttötilannetta, kun lämpötilavaihtelua ei ole ja saaden suurimman epävarmuuden lämpötilapoikkeaman ollessa 10 °C käyttötilanteesta sekä olosuhteet ovat epävakaat. Ohjekortissa ei kuitenkaan oteta kantaa lämpötilapoikkeaman vaikutuksen suuntaan. Lämpötilavaikutuksen suunta betonin suhteelliseen kosteuteen tiedetään, mutta Suomessa vaikutuksen suuruutta ei yleisesti uskalleta arvioida.

Betonin suhteellinen kosteus on betonin huokosilman ominaisuus, joka määräytyy betonin lämpötilan ja betonin huokosten ilmassa olevan vesihöyryn määrän perusteella. Huokoisena materiaalina betonilla on hygroskooppinen ominaisuus, joka tarkoittaa kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta ympäröivästä ilmasta. Tätä ominaisuutta kuvataan sorptiokäyrällä (tasapainokosteuskäyrä). Betonin tasapainokosteuskäyrällä on myös lämpötilariippuvuus; kylmempi materiaali sitoo kosteutta enemmän kuin lämmin materiaali. Kyseinen ilmiö havaitaan betonin RH arvoissa siten, että lämpötilan laskiessa myös RH laskee ja lämpötilan noustessa RH kasvaa. Nykytiedon mukaisesti tämä aiheutuu betonin lämpötilan nousun aiheuttamasta molekulaarisesta lämpöliikkeestä, minkä seurauksena huokosten pintaan fysikaalisesti sitoutuneita vesimolekyylejä vapautuu betonin huokosilmaan, jolloin huokosilman suhteellinen kosteus kasvaa [2]. Betonin lämpötilan vaikutusta betonin suhteelliseen kosteuteen on tutkittu laboratoriokoesarjojen avulla jonkin verran Pohjoismaissa, ja betonin suhteellisen kosteuden

muutostekijä $\Delta RH/\Delta T$ on kuvattu suhteessa mitattuun betonin suhteelliseen kosteuteen Nilssonin [4], Sjöbergin et al. [5] ja Fredinin & Skoogin [6] tutkimuksissa.

Tässä artikkelissa keskitytään Suomessa yleisesti käytettävien lattiabetonien suhteellisen kosteuden lämpöriippuvuuden selvittämiseen. Artikkelissa esitellään RTA-opinnäytetyön tulokset, jossa selvitettiin useiden eri vesisideainesuhteen betonien suhteellisen kosteuden lämpötilariippuvuutta ja ehdotetaan korjaustermiä lämpötilariippuvuuden huomioimiseksi mittaustuloksia tulkittaessa. Tutkimuksessa määritettiin kokeellisesti lämpötilamuutoksen aiheuttama RH muutos. Lisäksi lämpötilavaikutuksen merkittävyyttä havainnollistetaan esimerkkien avulla, ja esitetään miten työn tulosten avulla lämpötilavaikutuksen suuruutta ja suuntaa voidaan käytännössä arvioida.

2. Tutkimusmenetelmät ja materiaali

Tutkimuksessa käytettiin noin kolme vuotta vanhoja koekappaleita kuudesta nykyaikaisesta betonilaadusta. Käytetyt betonit ovat kahden eri betonitoimittajan valmistamia seostamattomia C35/45-luokan betoneita, joiden vesi-sementtisuhteet olivat noin tasoilla 0,45, 0,6 ja 0,73. Koekappaleista muodostettiin koesarjoja betonilaaduittain, ja koesarjojen sisällä betonikappaleiden kosteudet tasapainotettiin 50...100 %RH välille. Koekappaleet porattiin ja putkittiin RT-kortin RT103333 mukaisesti, ja koekappaleiden pinnat suljettiin kauttaaltaan vesihöyrytiiviisti. Koekappaleille toteutettiin lämpötilasyklit, jonka aikana koekappaleiden lämpötilaa muutettiin askeleittain seuraavasti: 20 °C → 30 °C → 20 °C → 12,5 °C → -2...6 °C → 12,5 °C → 20 °C. Koekappaleiden lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin jatkuvatoimisella seurantamittauksella, ja betonikoekappaleiden tasaantuneet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot poimittiin etäluettavista kuvaajista manuaalisesti tulosten käsittelyä varten. Jokaiselle lämpötilan muutosvälille laskettiin muutostekijän $\Delta RH/\Delta T$ arvo. Muutostekijät esitettiin pistekuvaajassa betonin mitatun suhteellisen kosteuden funktiona.

Tutkimusten suoritus on kuvattu tarkemmin RTA-opinnäytetyössä [7].

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Lämpötilamuutoksen korjaustekijän määrittäminen

Muutostekijäpisteiden välillä todettiin kirjallisuuslähteisiin tukeutuen toisen asteen polynomisen riippuvuus. Polynomimallien selitysasteet (R^2) ovat hyviä kaikkien muutoskuvaajien selitysasteiden R^2 keskiarvon ollessa 0,932 ja mediaanin ollessa 0,935. Mitä lähempänä selitysaste R^2 on arvoa 1, sitä paremmin mallin selittävä muuttuja kuvaa selitettävän muuttujan arvoja.

Tulosten perusteella ehdotetaan seuraavia lämpötilariippuvia suhteellisen kosteuden korjaustekijöitä, mikäli mittauksessa poiketaan käyttötilanteen lämpötilasta:

- 5 % varmuusmarginaalin sisältävä betonin suhteellisen kosteuden korjaustekijä betonin lämmitessä ($T_{\text{mittaus}} < T_{\text{käyttötilanne}}$):

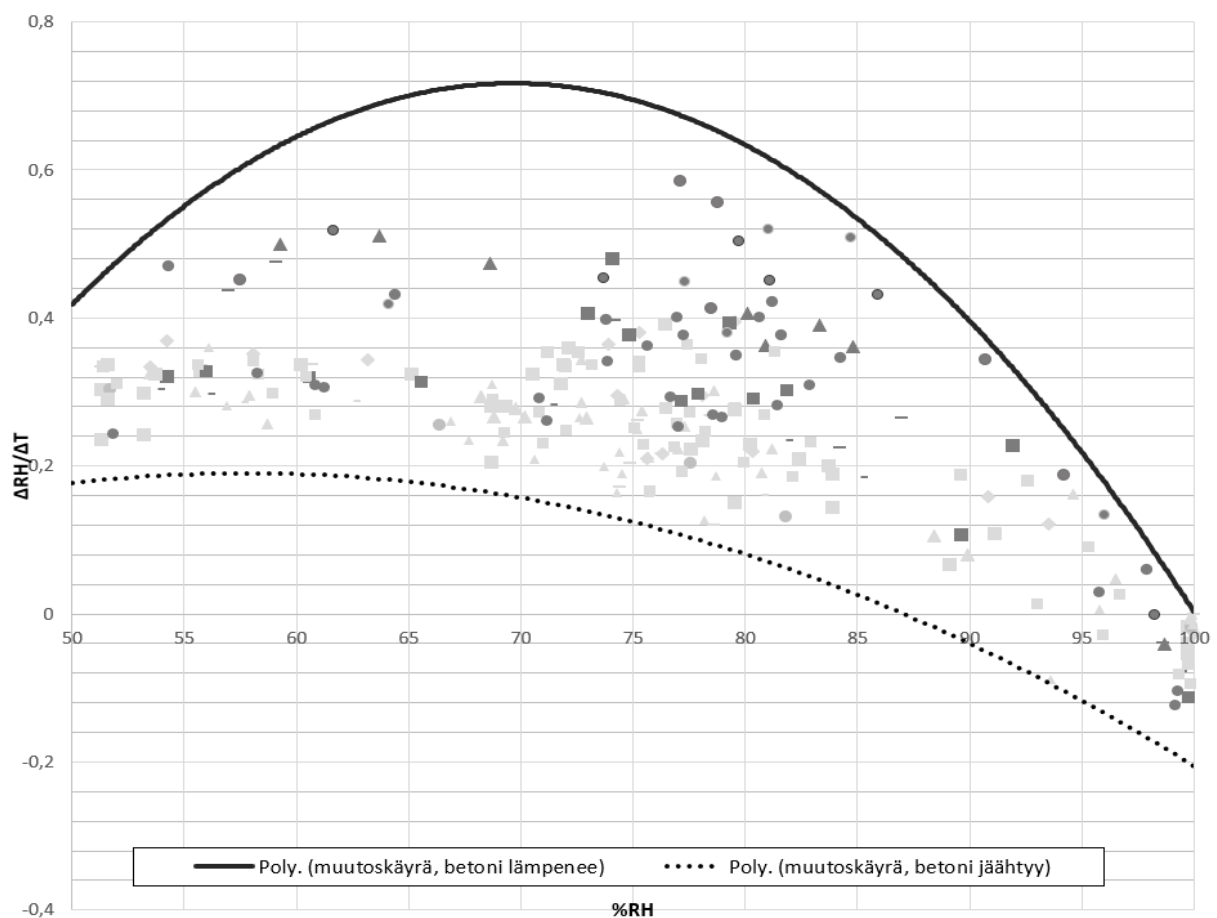
$$\Delta RH = (-7,75 * 10^{-4} * RH^2 + 0,10794 * RH - 3,0414) * \Delta T \quad (1)$$

- 5 % varmuusmarginaalin sisältävä betonin suhteellisen kosteuden korjaustekijä betonin jäähtyessä ($T_{\text{mittaus}} > T_{\text{käyttötilanne}}$):

$$\Delta RH = (-2,22 * 10^{-4} * RH^2 + 0,02567 * RH - 0,5514) * \Delta T \quad (2)$$

missä ΔRH = betonin suhteellisen kosteuden korjaustermi yhtä lämpötila-astetta kohti (%RH/°C)
 RH = betonin mitattu suhteellinen kosteus (%RH)
 ΔT = mittaushetken betonin lämpötilan ($T_{mittaus}$) ja käyttötilanteen betonin lämpötilan ($T_{käyttötilanne}$) erotus (°C)

Varmuusmarginaalit sisältävät muutoskäyrät tilanteille, kun betonin lämpötila nousee tai laskee, on esitetty seuraavassa kuvassa 1. Betonin lämpötilan noustessa myös betonin huokosilman suhteellinen kosteus nousee, ja vastaavasti betonin lämpötilan laskiessa myös betonin huokosilman suhteellinen kosteus laskee. Kuvan 1 mukaisesti muutostermillä korjatut tulokset ovat käytännön sovellusten kannalta turvallisella puolella 5 % varmuusmarginaalien ansiosta.



Kuva 1. Muutoskäyrät betonin suhteellisen kosteuden korjaamiseksi, kun betonin lämpötila nousee (ylempi, yhtenäinen käyrä) tai betonin lämpötila laskee (alempi, pisteviivakäyrä). Muutoskäyrät sisältävät 5 % varmuusmarginaalit. Kuvaajassa näkyvät myös yksittäisistä lämpötilamuutoksista lasketut muutospisteet. Tummanharmaalla on merkitty korkeiden lämpötilojen (lämpötilaväli 20...30 °C) muutospisteet, vaaleanharmaalla matalampien lämpötilojen muutospisteet.

3.2 Vertailu betonin suhteellisen kosteuden mittaustulosten korjaamisesta

Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen ohjeistetaan RT-kortissa RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen [1]. RT 103333:n mukaan porareikämenetelmän suosituslämpötila

(rakenteen päällystettävyyttä arvioitaessa) on +18...25 °C, kun rakenteen kosteuspitoisuutta on tarkoitus arvioida normaalissa huoneenlämpötilassa. Porareikämittaus suositellaan tehtävän lähellä lattian käytönaikaista lämpötilaa, ja tällöin esimerkiksi lattialämmitettävissä kohteissa porareikämittausmenetelmää ei tule käyttää mittausmenetelmästä aiheutuvan virheen takia. Mittausolosuhde-epävarmuuden arvioidaan olevan ±5...6 %RH, kun rakenteen lämpötila poikkeaa oletetusta käyttölämpötilasta yli 5 °C [1].

Seuraavassa taulukossa 1 verrataan yhtälön 1 avulla lasketun korjaustermin ΔRH ja RT 103333 arvioitua mittausolosuhde-epävarmuutta Tmo tilanteissa, joissa betoni lämpenee.

Taulukko 1. Lämpötilavaikutuksen arviointi korjaustermin ja RT 103333 mukaan tilanteissa, joissa betoni lämpenee. Asteriskilla (*) on esitetty kuvitteelliset tilanteet, joissa betonin kosteusmittausta tehdessä ei olla virheellisesti huomioitu tulevaa lattialämmitystä.

RH kriteeri	RH mitattu, epävarmuus huomioitu	Rakenteen mittaus-hetken lämpötila	Rakenteen käyttö-tilanteen lämpötila	Arvioitu rakenteen käyttö-tilanteen RH	ΔRH , korjaustermin mukaan	Tmo RT 103333 mukaan
	[%RH]	[°C]	[°C]	[%RH]	[%RH-yksikköä]	[%RH-yksikköä]
Kriteeri 85 % RH	82	18	23	85,0	3,0	±3...5
	79	18	25	83,5	4,5	±6
	82	20	25	85,0	3,0	±3...5
	79	15	25	85,5	6,5	±6
	82*	18	27	87,4	5,4	±7
Kriteeri 75 % RH	72	18	23	75,6	3,6	±3...5
	69	18	25	74,0	5,0	±6
	72	20	25	75,6	3,6	±3...5
	69	15	25	76,2	7,2	±6
	72*	18	27	78,4	6,4	±7

*tapaus, jossa virheellisesti ei ole huomioitu tulevaa lattialämmitystä. Laatan oikea käyttölämpötila on 27 °C.

Taulukossa 2 verrataan yhtälön 2 avulla lasketun korjaustermin ΔRH ja RT 103333 arvioitua mittaolosuhde-epävarmuutta T_{mo} tilanteissa, joissa betoni jäähtyy. Taulukossa on esitetty myös esimerkkejä, joissa arvioidaan tehokuivatettavan rakenteen jäähtymisen vaikutusta poikkeavan korkeassa lämpötilassa mitattuun kosteusmittaustulokseen. Tulosten perusteella voidaan havaita, että korjauksen vaikutus alaspäin ei ole erityisen merkittävä.

Taulukko 2. Lämpötilavaikutuksen arviointi korjaustermin ja RT 103333 mukaan tilanteissa, joissa betoni jäähtyy. Asteriskilla () on esitetty kuvitteelliset tilanteet, joissa tehokuivatetun betonin lämpötila on poikkeavan korkea.*

RH kriteeri	Tavoiteltu RH	Rakenteen mittaushetken lämpötila	Rakenteen käyttö-tilanteen lämpötila	Arvioitu RH rakenteen käyttö-tilanteen RH	ΔRH , korjaustermin mukaan	T_{mo} RT 103333 mukaan, %RH
	[%RH]	[°C]	[°C]	[%RH]	[%RH-yksikköä]	[%RH-yksikköä]
Kriteeri 85 % RH	82	25	21	82,2	-0,232	±3
		30	21	82,5	-0,493	±6
		40*	21	83	-0,935	
		50*	21	83,3	-1,330	
Kriteeri 75 % RH	72	25	21	72,6	-0,566	±3
		30	21	73,2	-1,238	±6
		40*	21	74,5	-2,438	
		50*	21	75,5	-3,500	

RT 103333 mukainen mittaolosuhde-epävarmuus T_{mo} sisältää myös muita virhelähteitä kuin betonin lämpötilan ja T_{mo} :ssa on pääosin varmuusmarginaalia tässä tutkimuksessa esitettyä korjaustermiä enemmän. Taulukon 1 perusteella voidaan havaita, että T_{mo} ei kaikissa tilanteissa sisällä ylimääräistä varmuusmarginaalia lainkaan (T_{mo} :n valintatavan mukaan), mikä on huomionarvoista, koska tämän tutkimuksen yhteydessä muut virhelähteet pyrittiin huolellisesti minimoimaan.

RT 103333 mukaisessa suosituslämpötilassa 18...25 °C korjaustermin avulla laskettu lämpötilavaikutus on kaikissa tarkastusväleissä T_{mo} :n vaihteluvälissä. Suosituslämpötilan ulkopuolella korjaustermin avulla määritetty lämpötilavaikutus on T_{mo} :n ulkopuolella, samoin kuin esimerkiksi lattialämmitettyjen rakenteiden yhteydessä. Lattialämmitys on kuitenkin RT 103333:ssa huomioitu niin, että tarkkuusluokkaa tulee heikentää vähintään yhdellä (esimerkiksi $\pm 3 \rightarrow \pm 4$), mikäli porareikämittaus tehdään lattialämmityksen vaikutusalueella (1). T_{mo} esitetään \pm -kokonaislukuna, ja betonin lämpötilan laskiessa mittaolosuhde-epävarmuus T_{mo} ylikorjaa mittaustuloksia merkittävästi. Mikäli mittaustulosta korjataan T_{mo} :n mukaisesti alaspäin betonin jäähtyessä, liian suuri vaihteluväli voi korjata tuloksia virheellisesti liian kuivan puolelle.

RT 103333 mainitaan, että epätarkkuustekijöiden tarkkaan arviointiin ei yleensä ole olemassa selkeitä laskentaperusteita. Tässä tutkimuksessa esitettyä korjaustermiä käyttäen betonin

suhteellisen kosteuden lämpötilavaikutusta on mahdollista arvioida aiempaa tarkemmin ja tutkimustietoon perustuen, ja parantaa mittausmenetelmän virhetarkastelun luotettavuutta. Suositus mitata betonin suhteellinen kosteus lähellä rakenteen käytönaikaista lämpötilaa on yleisohjeena hyvä ja perusteltu. Korjauskerroin vaikuttaa julkaisussa RT103333 esitettyyn mittausolosuhde-epävarmuuteen, mutta kokonaisepävarmuustekijän muihin osatekijöihin (mittalaite- ja mittaussuoritusepävarmuudet) tutkimuksen tuloksilla ei ole vaikutusta.

4. Yhteenveto

Tutkimuksen perusteella tarkastelluille betoneille pystytään ehdottamaan lämpötilariippuvaisen korjauskertoimen huomioimista suhteellisen kosteuden mittauksissa. Porareikämittauksen lämpötilavaikutusta on mahdollista arvioida aiempaa tarkemmin ja tutkimustietoon perustuen, ja parantaa mittausmenetelmän virhetarkastelun luotettavuutta. Korjauskerroin vaikuttaa julkaisussa RT103333 esitettyyn mittausolosuhde-epävarmuuteen, mutta kokonaisepävarmuustekijän muihin osatekijöihin (mittalaite-epävarmuus ja mittaussuoritusepävarmuus) tutkimuksen tuloksilla ei ole vaikutusta.

Lähdeluettelo

- [1] RT103333. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. 2021. Rakennustietosäätiö RTS.
- [2] Powers T. & Brownyard T. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. ACI Journals 42: 1946 ja 43: 1947.
- [3] Nevander, L.E. & Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok, Praktik och teori 2nd ed. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 s.
- [4] Nilsson, L.-O. 1987. Temperature effects in relative humidity measurements on concrete – Some preliminary studies. Nordic Symposium on Building Physics, 8/1987.
- [5] Sjöberg, A., Nilsson L.-O. & Rapp, T. 2002. Fuktmätning i betonggolv med golvvärme, etapp I: Förstudie. Institutionen för Byggnadsmaterial, CTH. 1/2002.
- [6] Fredin H. & Skoog H. 2005. Fuktmätning i betong. Temperatureffekter samt korrigeringsförfarande vid RF-mätning. Lund tekniska högskolan, byggnadsmaterial. TVBM-5057. 99 s.
- [7] Virtanen, L. (tulossa 2023). Betonin lämpötilan vaikutus betonin suhteelliseen kosteuteen. RATEKO, rakennusterveysasiantuntijan opinnäytetyö.

Reikätiilen ja laastin kosteustekninen yhteistoiminta materiaalikokeissa

Pauli Karjala, Ilkka Tuurala, Eero Tuominen, Ilkka Valovirta ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Kosteustekniset materiaaliominaisuudet ovat erityisen tärkeitä tiilijulkisivuille, sillä niillä on suhteellisen suuri vedenimeytymiskerroin ja kosteuskapasiteetti. Umpitiilten ja laastin yhteistoimintaa on tutkittu jonkin verran, mutta Suomessa julkisivuissa yleisesti käytettyä reikätiiltä on tutkittu hyvin vähän. Tässä tutkimuksessa verrattiin yhden tiilituotteen kahta erää testaamalla tiiliä ja laastia erikseen, sekä muurattuina kappaleina. Lisäksi määritettiin julkisivun pinta-alapainotetut materiaaliominaisuudet käyttäen tiilelle ja laastille erikseen mitattuja materiaaliominaisuuksia. Materiaaleille määritettiin vesihöyrynläpäisevyys, vedenimeytymiskerroin sekä kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Pinta-alapainotetut materiaaliominaisuudet vastasivat melko hyvin muurattujen kappaleiden materiaaliominaisuuksia. Pelkistetyn tiiliseinän materiaaliominaisuudet erosivat pinta-alapainotetuista ominaisuuksista noin 11 %, ja muurattujen kappaleiden ominaisuuksista 30 %. Materiaalien yhteistoiminta ja reikien vaikutus osoittautui kuitenkin suhteellisen pieneksi verrattuna muihin tekijöihin. Pelkästään tiilituotteen kahden polttoerän ero materiaaliominaisuuksissa oli 58 %.

1. Johdanto

Julkisivurakenteiden merkittävin kosteudenlähde on viistosade. Sääolotutkimukset [1–3] ovat osoittaneet, että ilmastonmuutos lisää viistosateen määrää pohjoisella lauhkealla vyöhykkeellä. Seinille osuvan sateen määrä kasvaa lisääntyvien sademäärien ja tuulennopeuksien mukana. Viistosade on erityisen merkittävä tiilirakenteille niiden korkean kosteuskapasiteetin ja vedenläpäisyn vuoksi. Tuulettuvien seinärakenteiden tutkimus [4–11] onkin yleistynyt viime vuosina. Rakenteiden testaamisen ja mallinnuksen tukena tarvitaan kuitenkin myös tarkkoja materiaaliominaisuuksia.

Tuulettuvissa tiilijulkisivuissa käytetään yleisesti reikätiiliverhousta uloimpana kerroksena. Niiden mallinnus tehdään lähtökohtaisesti yhtenä homogeenisena materiaalikerroksena johtuen mallinnuksen haasteista sekä toisaalta tarkemman tiedon puutteesta. Verrattuna umpitiileen, reikätiili tuo mukanaan uuden muuttujan rakenteen toimintaan. Tässä tutkimuksessa verrataan yksinkertaistettua homogeenistä tiiliseinää tarkemmin määriteltyihin kosteusteknisiin materiaaliominaisuuksiin. Tiilen ja laastin materiaaliominaisuudet testataan erikseen, sekä yhdessä muurattuja saumakappaleita käyttäen. Muurattujen kappaleiden lisäksi tiilen ja laastin ominaisuuksista määritetään pinta-ala painotettu keskiarvo tiiliseinälle.

Tämä tutkimus on tehty osana BusinessFinlandin rahoittamaa FutureSpaces-tutkimushanketta, jonka tavoitteena oli luoda uusi palvelukonsepti korjausrakentamiseen.

1.1 Aiemmat tutkimukset

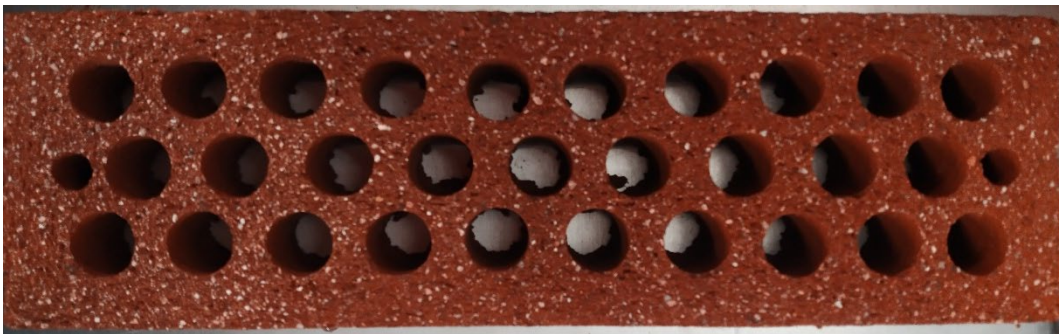
Massiivitiilirakenteiden tutkimuksessa [12] on esitetty toistuvien saumojen aiheuttavan lisävastusta kosteuden kulkeutumiselle. Toisaalta Vereecken ja Roels [13] eivät löytäneet merkittävää eroa todellisen rakenteen ja homogeenisen tiilimallin välillä. Tämä tutkimus ei kuitenkaan huomionnut kantavan rakenteen halkeilun vaikutusta kosteuden siirtymiseen. Voidaan olettaa, että ei-kantavassa yksikerroksisessa julkisivuverhouksessa kosteus ei kulkeudu rakenteen suuntaisesti, jos rakenteessa ei ole merkittävää halkeilua.

Reikätiilen reikien vaikutusta kosteustekniseen toimintaan on tutkittu hyvin vähän. Reikätiilten lämmönjohtavuuden elementtimenetelmätutkimuksessa [14] huomattiin, että saumojen lisäksi laastin tunkeutumisella on merkittävä vaikutus rakenteen lämmönjohtavuuteen.

Darlyn, Janssen ja Carmeliet [15] tutkimuksessa verrattiin laastin kuivumisympäristön vaikutusta kapillaariseen kosteuskapasiteettiin. Kuivilla tiilillä muuratun rakenteen (dry-cured) laastin kapillaarinen kosteuskapasiteetti osoittautui muotissa kovettettua laastia alhaisemmaksi. Jatkotutkimuksessa [16] todettiin erojen kosteuskapasiteetissa ja vedenimeytymiskertoimessa johtuvan veden siirtymisestä tiileen kovettumisen aikana.

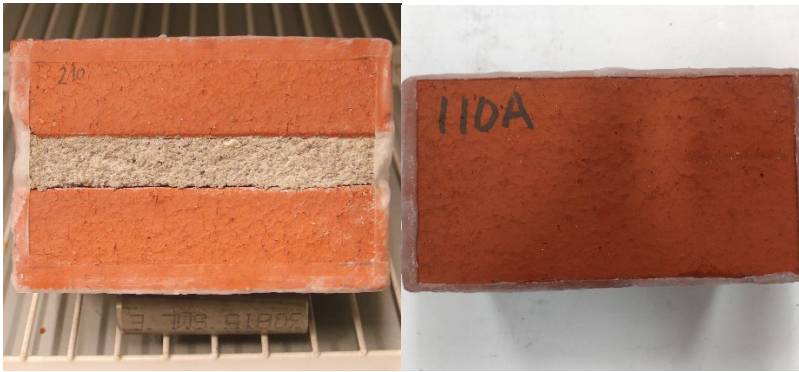
2. Materiaalit ja menetelmät

Tutkimus tehtiin osana Future Spaces hankkeen työpakettia 4 (TP4), jossa tutkittiin tiiliverhouksia, puurunkoisia ulkoseinärakenteita ja tuuletettujen yläpohjia. Rakenteita tutkittiin koerakennuksissa, materiaalikokein sekä mallintamalla. Koerakennusten reikätiiliverhouksia muurattiin kahdessa erässä, joten tutkittavaksi päätyi saman tiilituotteen kaksi polttoerää. Muurauksissa käytettiin samaa laastia. Esimerkki käytetyn tiilen poikkileikkauksesta näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Reikätiilen poikkileikkaus.

Reikien osuus tiilten kokonaistilavuudesta oli 28 ja 29 % tiilierille. Muurattujen kappaleiden testaaminen rajoitettiin vaakasaumaan, joka vastaa $\frac{3}{4}$ saumojen kokonaispituudesta. Tiilien geometrista johtuen kokeissa ei käytetty standardien mukaisia pyöreitä koekappaleita, vaan tiilille kehitettiin uudet $75 \times 140 \text{ mm}^2$ suorakulmaiset muotit.



Kuva 2. Pinnoitetut suorakulmaiset koekappaleet.

Tiilimuurausta tutkittaessa menetelmillä ja otannalla on suuri merkitys tuloksiin. Reiät, pysty- ja vaakasaumojen erot sekä muuraustekniikka ovat oleellisia rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Näiden tekijöiden lisäksi mekaanisesta rasituksesta johtuva halkeilu vaikuttaa kosteustekniseen toimintaan. Tässä tutkimuksessa tehtyjä vaakasaumakokeita voidaan kuitenkin käyttää saumojen merkittävyyden arviointiin, sekä kyseisen rakenteen mallintamiseen.

Taulukko 1. Materiaalit.

Materiaali	Tuote	Valmistaja	Muuta
Punatiili	MRT 75 Punainen	Wienerberger	75 x 85 x 285 mm ³
Muurauslaasti	ML 5 M100/600	Weber	

Isoja 300 x 300 mm² muurattuja seinäkappaleita käytettiin seinän tiheyden ja materiaalien pinta-alasuhteiden määrittämiseen. Keskimäärin 21.3 % seinäpinta-alasta on laastia. Käytetyissä vaakasaumakappaleissa vastaava osuus oli keskimäärin 21.7 %. Kaikki seinät ja koekappaleet valmistettiin ulkoilmassa säilytetystä kuivista tiilistä. Laastiominaisuuksien mittauskappaleet valmistettiin muottikivetystä laastista, sillä saumoista ei saatu irti riittävän isoja koekappaleita.

Taulukko 2. Materiaalitiheydet.

Materiaali	Tiheys (kg/m ³)	CV (%)
Muurattu rakenne 300 x 300 mm ²	1592	0.61
Kokonainen tiili - erä I ^a	1422	1.15
Kokonainen tiili - erä II ^a	1495	0.56
Umpitiilinäyte - erä I ^b	1952	1.08
Umpitiilinäyte - erä II ^b	2021	1.08
Kuivamuurattu laasti ^c	1757	1.86
Muottikuivattu laasti	1729	0.25

CV: Variaatiokerroin.

^a Tiilen reiät osana tilavuutta.

^b Tiilen tiheys ilman reikiä. Laskettu tiilestä poratuille kiekkoille.

^c Muuratusta rakenteesta leikattu laasti.

Saumakappaleille mitattiin tiilen ja sauman osuus tilavuudesta. Erikseen mitattuja materiaalien tiheyksiä käyttäen laskettiin painot tiilelle ja saumassa olevalle laastille. Reikiin tunkeutuneen laastin määrä arvioitiin kokonaispainon kautta. Lisäksi laskettiin huokosten teoreettinen täyttymisaste laastimäärän ja huokosten tilavuuden kautta. Koska materiaalien painot perustuvat erillisistä sarjoista määritettyihin tiheyksiin, eivät teoreettiset arvot ole kovin tarkkoja. Lisäksi tiilen ja laastin karhea rajapinta sisältää ilmahuokosia ja heikentää tulosten tarkkuutta. Koekappaleille mitattiin myös laastin maksimaalinen tunkeutumissyvyys mittatikkua käyttäen.

Taulukko 3. Muurattujen kappaleiden koostumus.

Koekappale	Paino (g)	Tiili ^a (g)	Sauma-laasti ^a (g)	Laasti rei'issä ^a (g)	Huokosten täyttymisaste ^a (%)	Laastin tunkeutumissyvyys [ylös / alas] ^b (mm)
Erä I sauma	1624	1198	321	104	25	16.6 / 20.0
Erä II sauma	1585	1218	317	50	12	14.4 / 21.6

^aMateriaaliominaisuuksista laskettu arvio.

^bLaastin keskimääräinen tunkeutumissyvyys tiilen rei'issä.

2.1 Testimenetelmät

Vesihöyrynläpäisevyys testattiin standardin SFS-EN 12572 [17] mukaan niiltä osin kuin mahdollista. Pyöreiden kappaleiden sijaan käytettiin suorakulmaisia kappaleita, joille johdettiin uusi reunavirheen kaava koekappaleen piirin mukaisesti. Kaava ei huomioi nurkka-alueita eikä niistä aiheutuvia ilmiöitä. Kokeet toteutettiin kuivakuppikokeina 22 °C lämpötilassa käyttäen kosteusparina 0 ja 50 %:n suhteellisia ilmankosteuksia.

Kapillaarista vedenimeytymiskoelaitteistoa käytettiin standardin SFS-EN 15148 [18] mukaisten veden imeytymiskertoimen A_w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$] ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden W_{cap} [kg/m^3] määrittämiseen. Lisäksi materiaaleille laskettiin veden tunkeutumiskerroin B_w [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$] standardin SFS-EN 15801 [19] mukaisesti.

Kaikille muuratuille koekappaleille laskettiin tiilen ja laastin osuudet kappaleen kokonaispinta-alasta. Tiilen ja laastin erikseen määritettyjä materiaaliominaisuuksia käyttäen koekappaleille laskettiin keskiarvoistettu materiaaliominaisuus, joka ei huomioi tiilen ja laastin yhteistoimintaa.

3. Tulokset

3.1 Vesihöyrynläpäisevyys

Taulukossa 4 esitetään vesihöyrynläpäisevyudet, ja lisäksi saumakappaleille niiden prosentuaalinen ero pinta-alapainotettuun vesihöyrynläpäisevyyteen (Ero).

Vesihöyrynläpäisevyyksien varianssi jäi alhaiseksi kaikilla kokeilla. Tiilen polttoerien välillä oli merkittävä (79 %) ero, ja laastin vesihöyrynläpäisevyys jäi tiilierien puoliväliin.

Taulukko 4. Vesihöyrynläpäisevyudet ja niiden suhde pinta-alojen mukaiseen keskiarvoon.

Materiaali	δ_v (m^2/s)	CV (%)	Ero (%)
Tiilierä I	2.13E-06	5.9	-
Erä I muurattu sauma	1.97E-06	8.0	-3
Laasti	1.68E-06	2.8	-
Tiilierä II	1.19E-06	4.0	-
Erä II muurattu sauma	1.85E-06	5.9	43

δ_v : Vesihöyrynläpäisevyys, CV: Variaatiokerroin, Ero: Muuratun kappaleen ero pinta-alapainotuksesta.

3.2 Vedenimeytymiskoe

Vedenimeytymiskokeen tulokset esitetään taulukoissa 5 ja 6. Veden tunkeutumiskertoimen varianssi oli muita kokeita suurempaa. Suure mittaa veden etenemiskorkeutta koekappaleessa, mikä luultavasti vääristyy huomattavasti epähomogeenisilla kappaleilla, joissa vesirintama voi edetä useammalla korkeudella yhtä aikaa.

Muuratuilla kappaleilla oletettiin olevan hieman korkeampi kapillaarinen kosteuskapasiteetti verrattuna pinta-alapainotettuihin tuloksiin. *Taulukon 3* mukainen laastin tunkeutuminen tiilen reikiin vastaa keskimäärin noin 6 kg/m^3 kasvua kapillaarisessa kosteuskapasiteetissa. Tiilierän I saumakappaleiden kosteuskapasiteetti vastasi oletettua virheen rajoissa, kun taas erälle II saumakappaleiden kapillaarinen kosteuskapasiteetti oli 33 % pinta-alapainotettua arvoa suurempi. Tulos on yllättävä, sillä erässä II oli laskennallisen määrittelyn mukaan vähemmän reikiin tunkeutunutta laastia. Näin suuri muutos saattaa johtua veden kertymisestä varsinaisiin tiilen reikiin.

Taulukko 5. Kapillaarinen veden imeytymiskerroin ja tunkeutumiskerroin.

Materiaali	A_w ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$)	CoV (%)	Ero (%)	B_w (mm/s^2)	CoV (%)	Ero (%)
Tiilierä I	0.106	12	-	0.90	6	-
Erä I muurattu sauma	0.090	7	-1	0.80	6	5
Laasti	0.035	5	-	0.25	10	-
Tiilierä II	0.084	9	-	1.51	15	-
Erä II muurattu sauma	0.107	10	46	1.10	16	-10

A_w : Kapillaarinen veden imeytymiskerroin, B_w : Veden tunkeutumiskerroin, Ero: Muuratun kappaleen ero pinta-alapainotuksesta.

Taulukko 6. Kapillaarinen kosteuspitoisuus.

Materiaali	W_{cap} (kg/m^3)	CoV (%)	Ero (%)
Tiilierä I	142	8	-
Erä I muurattu sauma	155	4	5
Laasti	170	5	-
Tiilierä II	84	9	-
Erä II muurattu sauma	138	6	34

W_{cap} : Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, Ero: Muuratun kappaleen ero pinta-alapainotuksesta.

3.3 Analysointi

Muurattujen ja pinta-alapainotettujen materiaaliominaisuuksien ero verrattuna homogeeniseen tiiliseinäen on esitetty *taulukossa 7*. Tiilierän I materiaaliominaisuudet poikkesivat keskimäärin vain 10 % yksinkertaistetusta homogeenisestä tiiliseinästä. Pinta-alapainotuksen ja muurattujen kappaleiden välillä ei ollut merkittävää eroa. Toisessa tiilierässä oli merkittävämpiä eroja menetelmien välillä, ja vedenimeytymiskertoimen tapauksessa muutos ei ollut edes samansuuntainen.

Taulukko 7. Muurattu rakenne verrattuna homogeeniseen tiiliseinäen.

Menetelmä	δ_v (%)	A_w (%)	W_{cap} (%)	Avg ^a (%)
Erä I pinta-alapainotettu	-5	-15	4	8
Erä I muurattu sauma	-8	-15	9	11
Erä II pinta-alapainotettu	9	-13	22	15
Erä II muurattu sauma	55	27	64	49
Absoluuttinen keskiarvo^b	19	17	25	-

^a Testierän/menetelmän keskimääräinen poikkeama tiilen materiaaliominaisuuksista.

^b Materiaaliominaisuuden keskimääräinen ero tiileen verrattuna.

Tiilierän I muurattujen ja pinta-alapainotettujen materiaaliominaisuuksien ero on virheen rajoissa. Tiilen ja laastin rajapinnoilla ei siis ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Homogeeniseen tiiliseinäen verrattuna ero oli hieman suurempi, n. 5–15 % riippuen materiaaliominaisuudesta.

Tiilierällä II muurattujen kappaleiden vesihöyrynläpäisevyys, kapillaarinen vedenimeytymiskerroin ja kosteuskapasiteetti olivat noin 40 % pinta-alapainotettuja materiaaliominaisuuksia suurempia. Menetelmällä oli siis merkittävä vaikutus tuloksiin.

Muuratut ja pinta-alapainotetut materiaaliominaisuudet poikkesivat homogeenisesta rakenteesta keskimäärin 19 % (δ_v), 17 % (A_w) ja 25 % (W_{cap}), kun taas ero tiilen polttoerien välillä oli 79 %, 27 % ja 69 %.

4. Yhteenveto

Tiilen ja laastin yhteisvaikutus sekä laastin tunkeutuminen reikiin eivät ole kovin merkittäviä tekijöitä tiilverhouksen kokonaisuuden kannalta. Pinta-alapainotettujen materiaaliominaisuuksien käyttäminen on riittävä menetelmä useimmissa tapauksissa, jos halutaan arvioida yksittäisen kohteen materiaaliominaisuuksia. Työmenetelmät, rasisusvauriot ja pystysaumojen vuoto ovat kuitenkin luultavasti merkittävämpiä tekijöitä useimmissa tapauksissa.

Tiilen polttoerien välinen ero osoittautui suurimmaksi muuttujaksi tässä tutkimuksessa. Tarkempien materiaaliominaisuuksien käyttö julkisivujen mallinnuksessa edellyttää julkisivutiilien materiaaliominaisuuksien ja niiden vaihtelun tarkempaa tutkimusta. Reikätiilien tapauksessa olisi tarpeellista myös tutkia reikien mahdollista täyttymistä vedellä.

Lähdeluettelo

- [1] Orr SA, Young M, Stelfox D, Curran J and Viles H. 2018 Wind-driven rain and future risk to built heritage in the United Kingdom: Novel metrics for characterising rain spells *Sci. Total Environ.* 640–641 1098–111.
- [2] Laukkarinen A, Jokela T, Vinha J, Pakkala T, Lahdensivu J, Lestinen S, et al. 2022 Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdystehontarpeen mitoitusolosuhteet: RAMI-hankkeen loppuraportti. Tampereen yliopisto. [Internet] Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2438-4>
- [3] Dukhan T and Sushama L. 2021 Understanding and modelling future wind-driven rain loads on building envelopes for Canada *Build. Environ.* [Internet]. 196 107800. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321002079>
- [4] Prada A, Baratieri M and Gasparella A. 2013 Analysis of the impact of ventilated cavities on the performance of opaque components *BSA Conference IBPSA-Italy*. [Internet] 353–62.
- [5] Van Belleghem M, Steeman M, Janssens A and De Paepe M. 2015 Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls *J. Build. Phys.* [Internet]. 38(4) 317–49. Saatavilla: <https://doi.org/10.1177/1744259114543984>
- [6] Gagliano A, Nocera F and Aneli S. 2016 Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period. *Energy Build.* [Internet]. 122 131–9. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816302882>
- [7] Buratti C, Palladino D, Moretti E and Palma RD. 2018 Development and optimization of a new ventilated brick wall: CFD analysis and experimental validation. *Energy Build.* [Internet]. 168 284–97. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817338069>
- [8] Vanpachtenbeke M, Langmans J, Van den Bulcke J, Van Acker J and Roels S. 2020 Modelling moisture conditions behind brick veneer cladding: Verification of common approaches by field measurements. *J. Build. Phys.* [Internet]. 44(2) 95–120. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1177/1744259120908283>
- [9] Gagliano A and Aneli S. 2020 Analysis of the energy performance of an Opaque Ventilated

- Façade under winter and summer weather conditions. *Sol. Energy* [Internet]. 205 531–44. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20305776>
- [10] Stazi F, Ulpiani G, Pergolini M, Di Perna C and D’Orazio M. 2020 The role of wall layers properties on the thermal performance of ventilated facades: Experimental investigation on narrow-cavity design. *Energy Build.* [Internet]. 209 109622. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819324636>
- [11] Rahiminejad M, Khovalyg D. 2021 Review on ventilation rates in the ventilated air-spaces behind common wall assemblies with external cladding. *Build. Environ.* [Internet]. 190 107538. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320309057>
- [12] Ramirez R, Ghiassi B, Pineda P and Lourenço PB. 2021 Experimental characterization of moisture transport in brick masonry with natural hydraulic lime mortar. *Build. Environ.* [Internet]. 205 108256. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321006569>
- [13] Vereecken E, Roels S. 2013 Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux? *Constr. Build. Mater.* [Internet]. 41 697–707. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812009816>
- [14] Alghamdi A, and Alharthi H. 2017 Multiscale 3D finite-element modelling of the thermal conductivity of clay brick walls. *Constr. Build. Mater.* 157 1–9. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.081>
- [15] Derluyn H, Janssen H and Carmeliet J. 2011 Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. *Constr. Build. Mater.* 25(9) 3685–3693. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063>
- [16] Janssen H, Derluyn H, and Carmeliet J. 2012 Moisture transfer through mortar joints: A sharpfront analysis. *Cement and Concrete Research* 42(8) 1105–1112. Saatavilla: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.004>
- [17] EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method
- [18] EN ISO 15148:2002 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion
- [19] EN ISO 15801:2009 Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity

Ilmanläpäisevyyden mittauslaite ja eräiden puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä

Sami Haapaniemi, Jaakko Hietikko, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään ECOSAFE ja Roof Convection -tutkimusten jo valmistuneiden ilmanläpäisevyydsmittausten koejärjestely ja tulokset. Kokeet on suoritettu Sami Haapaniemen diplomityönä toteutetulla ilmanläpäisevyyden mittauslaitteistolla, jolla voidaan mitata verrattain suuria koekappaleita; tässä tutkimuksessa käytettiin n. 500 mm halkaisijaltaan ja 600 mm korkeudeltaan olevia lieriöitä. Roof Convection ja ECOSAFE-hankkeiden puhalluseristeisten yläpohjien sisäisen konvektion tutkimuksissa on tähän mennessä tutkittu kolmea eri materiaalia, joiden ilmanläpäisevyys on mitattu: kahta eri lasipuhallusvillaa sekä kutterinlastueristettä.

1. Johdanto

Puhalluseristeisten yläpohjien sisäisen konvektion tutkimuksissa tarvitaan tieto puhalletun eristeen ilmanläpäisevyydestä. Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmällä on ollut käytössä vain pienille koekappaleille soveltuva ilmanläpäisevyyden mittauslaitteisto, joka ei sovellu hyvin irtoeristeiden mittaamiseen. Tätä puutetta paikkaamaan Sami Haapaniemi rakensi standardin SFS-EN 12114 [1] mukaisen ilmanläpäisevyydlaitteiston, jolla voidaan tutkia verrattain suuria koekappaleita sekä puhalluseristeitä. Tutkimuslaitteisto koostuu kammiosta, johon puhallettavan ilman määrä mitataan ja jonka paine-eroa näytekappaleen yli voidaan säätää.

Tampereen yliopistolla käynnissä olevassa Roof Convection -hankkeessa tutkitaan avohuokoisilla puhalluseristeillä eristetyissä avoimissa tuulettuvissa yläpohjissa esiintyvää luonnollista konvektiota, jossa eristeen sisäiset lämpötilaerot luovat lämpimään ilmassaan nostetta ja saavat aikaan konvektiovirtauksia, jolloin lämmön siirtyminen eristeen läpi kasvaa pelkkään johtumalla siirtyvään lämpöön nähden. Tämän tutkimuksen osalta tulosten laskennassa materiaaliominaisuuksien määrittäminen on hyvin keskeisessä asemassa.

Avohuokoisien eristemateriaalin ilmanläpäisevyys on vahvasti riippuvainen eristeen asennustiheydestä, joten tutkitulle eristetyypille on tärkeää pystyä määrittämään ilmanläpäisevyys samassa tiheydessä kuin eriste on asennettu tutkittavaan yläpohjarakenteeseen. Tähän mennessä rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla on tutkittu Roof Convection -hankkeessa kahta eri lasivillaa ja ECOSAFE-hankkeiden yhteydessä kutterinlastueristettä. Tässä artikkelissa esitetään näiden materiaalien ilmanläpäisevyyden mittaustulokset.

2. Tutkimuksen toteutus

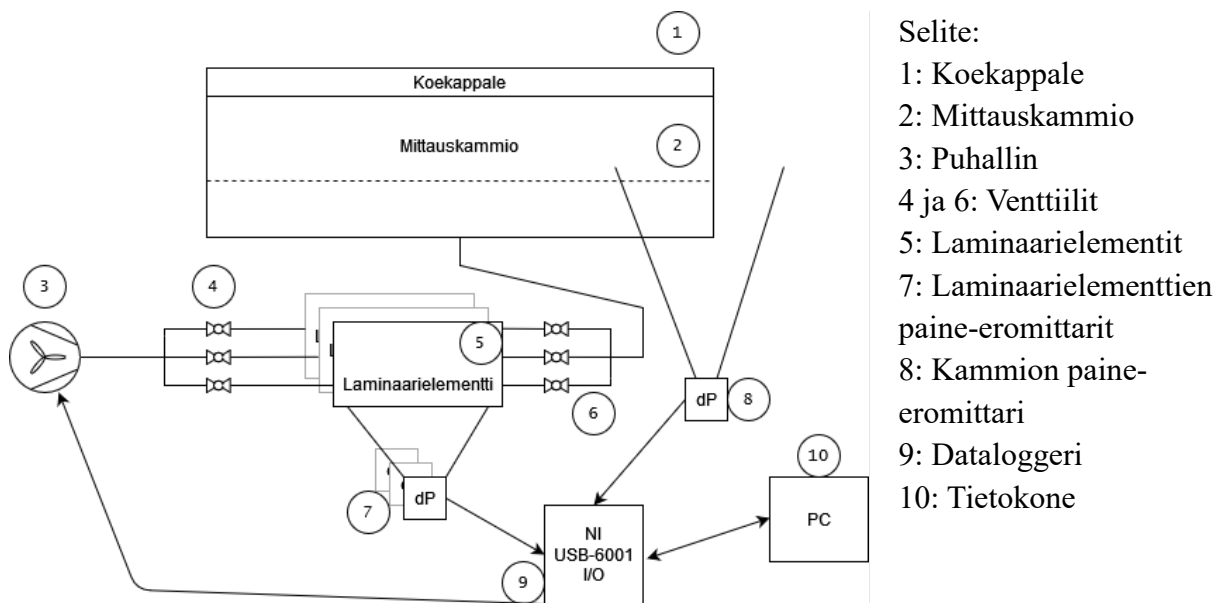
2.1 Teoria

Materiaalin ilmanläpäisevyys ilmaistaan yleensä ilman virtausnopeutena, joka materiaaliin syntyy metrin paksuisella kappaleella, jonka yli vallitsee yhden pascalin paine-ero eli yksikössä $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$. Edellä esitetty yksikkö pätee, kun materiaalin läpi tapahtuva ilmanvirtaus on laminaarista. Eristemateriaaleissa ilmavirtaukset tapahtuvat melko matalilla virtausnopeuksilla, jolloin virtaus pysyy pääosin laminaarisena. Ilman tilavuusvirta kasvaa lineaarisesti paine-eron kasvaessa. Tutkimuksessa mitataan eristenäytteiden yli vaikuttavaa paine-eroa ja läpi virtaavaa

ilman tilavuusvirtaa useilla eri paine-eroilla. Mittaustuloksiin sovitetaan suora, jonka kulma-kerroin antaa kyseisen näytteen ilmanläpäisevyyden, kun koekappaleen paksuus huomioidaan.

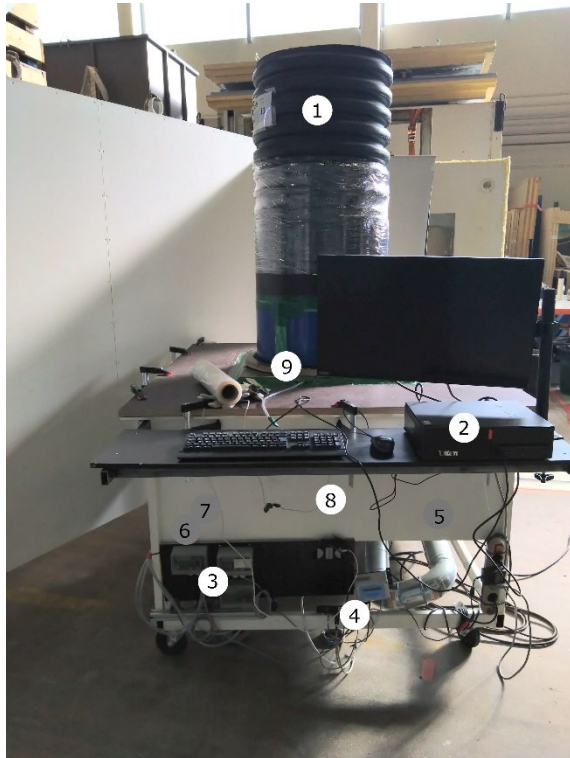
2.2 Ilmanläpäisevyyden mittauslaite

Sami Haapaniemen Tampereen yliopistolle vielä julkiasemattomana diplomityönä rakentama ilmanläpäisevyyden mittauslaite on rakennettu standardin SFS-EN 12114 [1] vaatimusten mukaisesti. Tutkimuslaitteessa ilma syötetään kammioon jänniteohjatulla kanavapuhaltimella 1–3 Furness Controls -merkkisen laminaarielementin läpi. Laminaarielementin mittauspisteiden välille syntyy läpi virtaavasta ilmamäärästä lineaarisesti riippuva paine-ero, joka mitataan paine-erolähettimillä, kuten myös koekappaleen yli vaikuttava paine-ero. Koekappaleen yli vaikuttavan paine-eron mittauspiste sijaitsee laminaarisen virtauksen varmistavan suodattimen ja koekappaleen alapinnan välissä. Toinen pää on yhteydessä huoneilmaan, kuten myös koekappaleen toinen puoli. Lisäksi mittauksen aikana vallitsevat olosuhteet (ilman suhteellinen kosteus, lämpötila ja absoluuttinen ilmanpaine) tallennetaan. Laitteen pääkomponentit on esitetty kuvan 1 kaaviossa.



Kuva 1. Mittauslaitteiston pääkomponentit.

Kuvassa 2 on esitetty ilmanläpäisevyyslaite mittausvalmiina. Lieriön muotoinen koekappale on asennettu peittämään laitteen sovitinlevyyden tehty aukko; mittalaitteen kammion mitat ovat 1200 mm × 1200 mm ja sitä pienemmät koekappaleet kiinnitetään sovitinkappaleen avulla. Mittalaitteella voidaan mitata tilavuusvirtoja, jotka ovat 0–600 litraa minuutissa ja paine-eroja väliltä 0–100 Pa, mutta laite on tehty modulaariseksi eli mittausaluetta voidaan muuttaa tarpeen mukaan. Nyt käsiteltävissä mittauksissa on käytetty paine-eroja väliltä 0–50 Pa, mikä kuvaa hyvin nykyisten rakennusten vaipan yli vaikuttavaa paine-eroa ja antaa siten kuvan eristeen ilmanläpäisevyydestä todellisissa olosuhteissa.



Selite:

Harmaalla numeroidut piilossa laitteen takana.

1: Koekappale

2: Tietokone

3: Laminaarieleментtien paine-eromittarit

4: Kammion paine-eromittari

5: Puhallin

6: Venttiilit

7: Laminaarieleментit

8: Kammio

9: Sovitinkappale

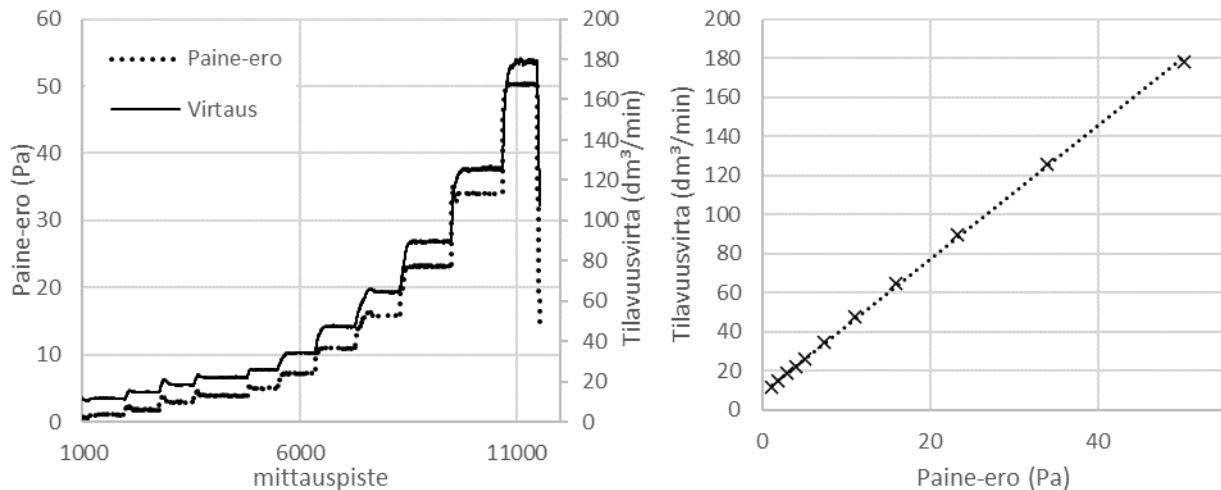
Kuva 2. Ilmanläpäisevyyslaitteisto ja lieriömallinen koekappale, joka on asennettu mitattavaksi.

2.3 Koejärjestely

Tampereen yliopistolla on käynnissä tutkimus, jossa tutkitaan luonnollisen konvektion syntymistä erilaisissa puhallettavissa eristemateriaaleissa rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteella. Näiden kokeiden yhteydessä on ollut tärkeää selvittää käytetyn eristemateriaalin rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet. Aina, kun rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteella on tehty uuden eristemateriaalin asennus, samaa eristettä on myös asennettu ilmanläpäisylaitteen koekappaleisiin.

Roof Convection -hankkeen kohdalla lasivillaeristeet on käynyt puhaltamassa siihen valtuutettu urakoitsija. Urakoitsijan toimintaan ei ole puututtu, vaan tutkijat ovat vain seuranneet, että eriste tulee asennettua haluttuun tavoitetiheyteen. ECOSAFE-hankkeissa [2] kutterinlastueriste on asennettu puhaltamalla eriste Tampereen yliopiston omalla puhalluslaitteella.

Ilmanläpäisevyyden mittaaminen on tehty portaittain usealla eri ennalta määrätyllä paine-erolla. Jokaisella paine-erolla tilavuusvirran annetaan tasoittua, vallitseva paine-ero ja tilavuusvirta tallennetaan ja sen jälkeen tuulettimen ohjausjännitettä kasvatetaan siten, että seuraava paine-eron tavoitearvo saavutetaan. Kuvassa 3 vasemmalla on esitetty yhden koekappaleen ilmanläpäisevyyden mittaustulokset ajan suhteen. Kuvaajasta nähdään paine-eron suhteen portaittainen mittauksen eteneminen.



Kuva 3. Vasemmalla erään ilmanläpäisevyyssmittauksen mittausdata. Oikealla mittausdatasta muodostettu sovitesuora.

Kuvassa 3 oikealla on puolestaan mitattu tilavuusvirta paine-eron funktiona. Kun paine-eron funktiona esitetyn tilavuusvirran mittapisteille lasketaan lineaarinen sovite, tämän suoran kulmakerroin antaa eristemateriaalin ilmanläpäisevyyden, kun koekappaleen paksuus huomioidaan.

2.4 Tutkitut materiaalit

Tässä artikkelissa käydään läpi ilmanläpäisevyyssmittausten tulokset taulukossa 1 esitetyille materiaaleille.

Taulukko 1. Tutkittavat materiaalit.

Eristemateriaali	Tiheys [kg/m ³]
lasivilla 1	20,2
lasivilla 2	19,5
kutterinlastu	88,1

Roof Convection -hankkeessa on tutkittu kahta eri lasivillaa. Ensimmäinen osoittautui puhalluksen jälkeen hyvin paakkuseksi eikä se käyttäytynyt mittauksissa kuten olisi voinut olettaa. Tästä syystä kyseisessä hankkeessa otettiin mukaan myös toisen valmistajan lasivillaeriste. ECOSAFE-hankkeissa on puolestaan tutkittu Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla ja siten myös ilmanläpäisevyysslaitteella kutterinlastueristettä, josta on seulomalla poistettu sekä pienet että suuret partikkelit. Kuvassa 4 on esitetty taulukon 1 materiaalit asennettuina koekappaleisiin.



Kuva 4. Kuvassa on taulukon 1 materiaalit asennettuina koekappaleisiin. Vasemmalta katsottuna lasivilla 1, lasivilla 2 ja kutterinlastueriste.

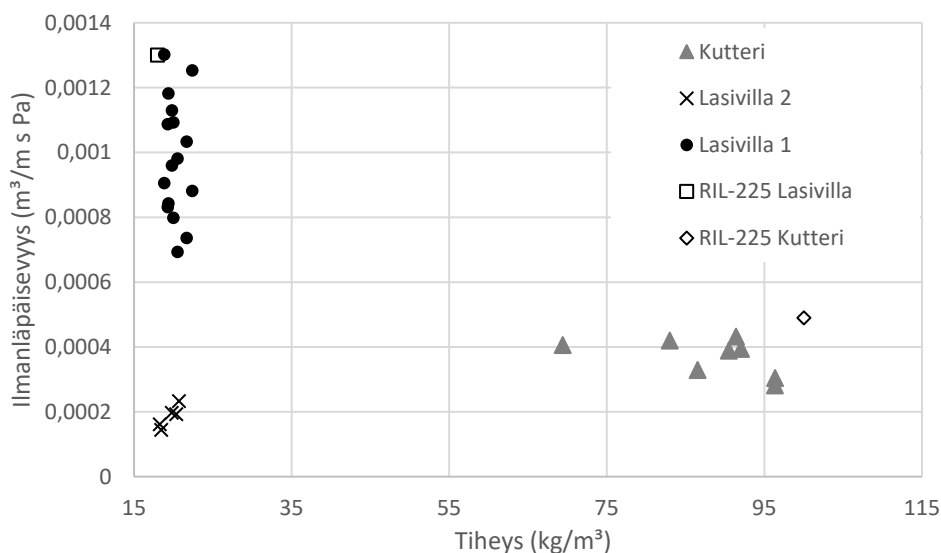
Mitatuista materiaaleista lasivillat erosivat toisistaan jo visuaalisesti hyvin paljon. Lasivilla 1 sisälsi melko isoja paakkuja, kun taas lasivilla 2 oli huomattavasti tasalaatuisempaa. Lasivillat ovat eri valmistajan tuotteita, joka osaltaan voi selittää eroja, mutta eroihin on myös voinut vaikuttaa käytetty kalusto. Lasivilla 1 purettiin säkeistä puhalluslaitteistoon juuri ennen puhallusta. Lasivilla 2 oli puolestaan puhalluslaitteistossa valmiina puhallusurakoitsijan saapuessa paikalle. Sekä puhalluslaite että työntekijät vaihtuivat eri puhalluskerroilla.

Eristevalmistajien esittämiin tavoitetehtyksiin ei koekappaleiden kanssa päästy. Tämä johtunee ainakin osittain koekappaleiden pienestä koosta suhteessa yläpohjiin, joihin ilmoitettu tavoitetehtyys pätee. Koekappaleilla jo pienet muutokset kokonaispainossa vaikuttavat voimakkaasti sen laskennalliseen tiheyteen. Myös reuna-alueiden vaikutus on huomattavasti suurempi kuin suuremmille aloille puhallettaessa.

3. Tulokset

Tässä tutkimuksessa mitattiin kahden eri puhalluslasivillan sekä yhden kutterinlastueristeen ilmanläpäisevyydet. Eristeiden ilmanläpäisevyydet mitattiin lähellä eristeiden tavoitetehtyttä, joka perustui rakennusfysiikallisella tutkimuslaitteella käynnissä olevien tutkimusten toteutuneisiin asennustiheyksiin. Eristemateriaalin tiheyden vaikutusta sen ilmanläpäisevyyteen on tutkittu tarkemmin Rakennusfysiikkaseminaarin 2023 artikkelissa ”Puhalluseristeiden ilmanläpäisevyydsmittaukset RIL225 julkaisuun” [2].

Kuvassa 5 on esitetty taulukon 1 eristemateriaaleille saadut ilmanläpäisevyydet tiheyden funktiona. Avohuokoisen materiaalin ilmanläpäisevyys kasvaa yleensä eksponentiaalisesti tiheyden pienentyessä [2]. Kuvassa 5 esitettyjen eristeiden tavoitetehtydet perustuvat rakennusfysiikallisella tutkimuslaitteella käynnissä olevien mittausten asennustiheyksiin. Lasivilla 1:n tavoitetehtyys on $15,1 \text{ kg/m}^3$ ja kutterinlastun $88,8 \text{ kg/m}^3$. Lasivilla 2:n tavoitetehtyttä ei saatu puhallusten aikana määritettyä, joten se tarkentuu vasta laitteiston tyhjennyksen yhteydessä.



Kuva 5. Lasivillanäytteiden ilmanläpäisevyydet tiheyden funktiona.

Taulukossa 2 on esitetty mitatuille materiaaleille keskiarvotulokset sekä tulosten keskihajonta. Vertailuna taulukossa on lisäksi annettu julkaisun RIL 225-2023 [4] tulokset vastaaville materiaaleille.

Taulukko 2. Mitatut ilmanläpäisevyydet.

Eristemateriaali	Tiheys [kg/m ³]	Ilmanläpäisevyys [10 ⁻⁶ m ³ /(msPa)]	Keskihajonta [10 ⁻⁶ m ³ /(msPa)]
lasivilla 1	20,2	980	180
lasivilla 2	19,5	190	34
kutterinlastu	88,1	370	57
RIL 225-2023 Liite 2 Avohuokoisten lämmöneristeiden ilmanläpäisevyyden yleiset suunnitteluarvot [4]			
Lasivilla, YP, avoin pinta	18	1300	
Kutterinlastu, YP, avoin pinta	100	490	

Taulukosta 2 nähdään, että lasivilla 1:n tulokset ovat selvästi lähempänä julkaisussa RIL 225-2023 [4] annettuja yleisiä suunnitteluarvoja. Lasivilla 2:n tulokset ovat puolestaan täysin eri suuruusluokkaa. Erot selittyvät suurelta osin luvussa 2.4 havaittujen erojen takia.

Kutterinlastueristeelle saatiin tässä tapauksessa hieman RIL 225-2023 [4] yleisiä suunnitteluarvoja parempi tulos. Materiaali ei vastaa esimerkiksi vanhojen purueristeisten rakennusten eristettä. Tässä tutkitusta kutterinlastueristeestä on poistettu sekä pienet että isot partikkelit, mikä parantaa tuotteen mitattua lämmönjohtavuutta, mutta heikentää ilmanläpäisevyyttä ja näin altistaa eristeen merkittäväälle sisäiselle konvektiolle. Ilmanläpäisevyyden parantamiseksi Tampereen yliopistolla käynnissä olevaan ECOSAFE3-hankkeeseen on otettu mukaan eristevaihtoehto, jossa taulukossa 2 mainittuun kutterinlastueristeeseen on sekoitettu painon suhteen 1:1 sahanpurua. Kyseiselle materiaalille ei ole saatavilla ilmanläpäisevyyksmittausten tuloksia tähän artikkeliin, mutta odotettavissa on, että purun pienemmät partikkelit alentavat materiaalin ilmanläpäisevyyttä.

4. Yhteenveto

Tässä artikkelissa esiteltiin suurempien koekappaleiden sekä puhalluseristeiden mittaamiseen rakennettu ilmanläpäisevyyden mittaustaite sekä kolmen eri avohuokoisen puhalluseristeen ilmanläpäisevyyden testitulokset. Eristemateriaaleille lasivilla 1 ja kutterinlastu saadut tulokset ovat linjassa aiempien RIL 225-2023 [4] avohuokoisille lämmöneristeille ilmoitettujen ilmanläpäisevyyden yleisten suunnitteluarvojen kanssa. Lasivilla 2:lle saadut tulokset olivat huomattavasti lasivilla 1:n vastaavia parempia. Lasivilla 2 on eri eristevalmistajan tuote ja huomattavasti tasalaatuisempaa kuin lasivilla 1.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN 12114:2000 Thermal performance of buildings. Air permeability of building components and building elements. Laboratory test method
- [2] Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet – ECOSAFE- ja ECOSAFE 2 -hankkeiden loppuraportti 2023
- [3] S. Haapaniemi, J. Hietikko, E. Tuominen ja J. Vinha, Puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksmittaukset RIL225 julkaisuun. Rakennusfysiikka 2023
- [4] RIL 225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta

Puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyssmittaukset RIL225 -julkaisuun

Eero Tuominen, Sami Haapaniemi, Ilkka Tuurala, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Suomessa yleisesti käytössä olevien levy- ja puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä tutkittiin Tampereen yliopistolla osana Roof Convection, sekä ECOSAFE ja ECOSAFE 2 -hankkeita talvella 2022–2023. Puhalluseristeiden mittaukset tehtiin Sami Haapaniemen rakentamalla laitteistolla, joka on esitelty tarkemmin toisessa Rakennusfysiikkaseminaarin 2023 artikkelissa ”Ilmanläpäisevyyden mittauslaite ja eräiden puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä” sekä vielä julkaisemattomassa Haapaniemen diplomityössä. Levyeristeiden ja kutterinlastujen mittaukset tehtiin vanhemmalla, vastaavalla toimintaperiaatteella toimivalla laitteella, joka on ollut jo pitkään rakennusfysiikan tutkimusryhmällä käytössä.

Puhalluseristeiden mittauksia tehtiin eri kokoisilla ja muotoisilla koekappaleilla tulosten luotettavuuden parantamiseksi. Eri muotoiset koekappaleet puhallettiin eri kerroilla. Mittaustulosten perusteella voitiin piirtää sovitefunktio puhallustiheyden ja ilmanläpäisevyyden välille. Tätä funktiota hyväksi käyttäen määritettiin ilmanläpäisevyydet valmistajan ilmoittamiin eri asennustapojen tavoitetehtäviin. Tulokset julkaistiin RIL225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta -kirjassa.

1. Johdanto

Uudistetussa RIL225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta -julkaisussa [1] on ohjeistettu sisäisen konvektion laskenta osaksi rakenteen energiatehokkuuden tarkastelua. Jotta sisäistä konvektiota voidaan arvioida, täytyy olla tiedossa paitsi eristetuotteen lämmönjohtavuuden, myös ilmanläpäisevyyden suunnitteluarvo. Ilmanläpäisevyyden mittaustuloksia on ollut huonosti saatavilla ja nyt suoritetuilla kokeilla haluttiin vastata tähän tutkimustarpeeseen.

Kokeet suoritettiin osana Roof Convection sekä ECOSAFE ja ECOSAFE 2 -hankkeita. Ympäristöministeriön ja yritysten rahoittamissa ECOSAFE-hankkeissa tutkittiin kutterinlastueristeisiä rakenteita. Paavo V. Suomisen rahaston ja yritysten rahoittamissa Roof Convection -hankkeissa puolestaan tutkitaan puhalluseristeiden sisäistä konvektiota yläpohjarakenteissa. Molempien hankkeiden tutkimuksista on myös muita esityksiä Rakennusfysiikka 2023 -seminaarissa.

2. Teoria

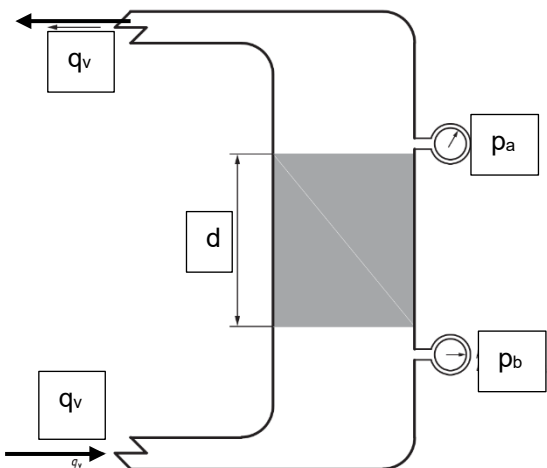
2.1 Ilmanläpäisevyys

Materiaalin ilmanläpäisevyys esitellään tyypillisesti yksikössä [$\text{m}^3/(\text{msPa})$], joka eristekerroksen paksuudella kerrottuna ilmaisee suoraan ilmavirtauksen määrän eristekerroksen yli paine-eron vallitessa. Tästä kääntäen voidaan havaita, että materiaalin ilmanläpäisevyys voidaan mitata määrittämällä koekappaleen läpi kulkeva tilavuusvirta paine-eron funktiona. Kun lisäksi huomioidaan koekappaleen paksuus, niin saadun funktion regressiosuoran kulmakerroin on ilmanläpäisevyys.

2.2 Mittauslaitteisto

Rakennusfysiikan tutkimusryhmällä on käytössä kaksi ilmanläpäisevyyden mittauslaitteistoa, jotka on rakennettu standardien SFS-EN ISO 9053-1-2018 [2] ja SFS-EN 12114 [3] vaatimusten mukaisesti. Vanhempi laitteisto on ollut tutkimusryhmän käytössä jo pitkään ja siinä on 200x200x300 mm³ kiinteä kammio, johon mitattava tuote asennetaan. Uudempi laitteisto on rakennettu Sami Haapaniemen vielä julkaisemattomassa diplomityössä ja siinä tutkittava koekappale kehyksineen tiivistetään laitteistoon, jolloin koekappaleen muoto ja koko voidaan valita tuotteen mukaan. Laitteiston tarkempi esittely löytyy Rakennusfysiikkaseminaarin 2023 artikkelista ”Ilmanläpäisevyyden mittauslaite ja eräiden puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä” [4].

Laitteistojen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Koekappale (kuva 1, paksuus d) asennetaan reunoiltaan ilmatiiviiseen kehykseen, kehys asennetaan tiiviisti laitteeseen ja laite tuottaa mitattavan ilmavirran (kuva 1, q_v) koekappaleen läpi. Lisäksi mitataan koekappaleen yli vallitseva paine-ero (kuva 1, $p_b - p_a$). Paine-eron mittaus tehdään antureilla, joiden mittaustarkkuus on vähintään 0,1 Pa. Ilmavirtaa puolestaan mitataan laminaariputkilla, joiden läpi tapahtuva ilmavirtaus on lineaarista suhteessa putken yli mitattavaan paine-eroon. Laminaariputkien absoluuttinen tarkkuus riippuu laitteistokokoonpanosta, koska ilmavirran mittausalueet ovat erisuuret, mutta suhteellinen tarkkuus on alle 1 % mitatusta tilavuusilmavirrasta.



Kuva 1. Ilmanläpäisevyyslaitteisto, periaatekuva [2].

Laitteiden mittausperiaate poikkeaa toisistaan hivenen. Vanhemmassa laitteessa ilmavirran suuruutta säädettiin käsin laitteen laminaariputken sallimalla mittausalueella 10...60 l/min käyttäen 5 l/min askellusta. Eri ilmavirtauksilla koekappaleen yli toteutunut paine-ero mitattiin. Uudemmallalla laitteistolla säätö tehtiin vähintään viiteen eri painetasoon 0...50 Pa välille ja toteutunut tilavuusvirta mitattiin.

3. Tutkimuksen toteutus

3.1 Koekappaleiden valmistus ja mittaaminen

Eri tuotteiden mittauksessa käytetty laite, koekappaleen muoto ja koko on merkitty taulukkoon 1. Levyeristeiden mittauksissa käytettiin vanhempaa laitteistoa, johon sopivat materiaalikappaleet leikattiin ja asennettiin käsin. Myös kutterinlastueristeiden mittaukset toteutettiin vanhalla laitteella, jonka kammioon eriste ripoteltiin käsin, koska kutterinlastun puhaltamiseen ei ollut käytettävissä luotettavaa puhalluslaitetta. Muut irtoeristeet, käytännössä puhalluseristeet, mitattiin

uudemmalla laitteistolla, jolloin sertifioitu puhallusurakoitsija pystyi asentamaan eristeen kerralla useisiin esivalmistettuihin kehyksiin. Eri mittaukset tehtiin noudattaen standardia [2].

Levyeristeet leikattiin 100 mm paksuisesta eristelevystä, joka otettiin levyeristepaketin keskeltä reunalla olevien muotovirheiden välttämiseksi. Eriste leikattiin 5–10 mm ylisuureksi, jotta se tiivistyi luotettavasti mittauskammion seiniin. Koekappale muodostettiin riittävän monesta eristelevystä, jotta tavoitekorkeus saavutettiin. Poikittaisen ilmanläpäisevyyden mittauksessa vastaavasti käytettiin kahta levykerrosta ja 20 mm filmivaneria, jotta 200 mm kammio saatiin täytettyä kokonaan.

Kutterinlastueristeet asennettiin vanhemman mittalaitteen kammioon ripottelemalla käsin. Ripottelun yhteydessä eriste täytettiin kerroksittain ja tiivistettiin tavoitetiheyden saavuttamiseksi. Mittauksia tehtiin eri tiheyksiin, koska eriste asennetaan eri tiheyksiin esimerkiksi seinärakenteissa kuin tuulettuvassa yläpohjassa. Kammion pohjalla käytettiin teräsverkkoa, jonka lankavahvuus oli <1 mm ja silmäkoko noin 3 mm. Verkko esti eristeen valumisen laitteiston alareunassa olevaan ilmapirtauksen tasauskammioon. Mittaukset toistettiin lisäksi lieriön muotoisilla koekappaleilla, joissa alkuperäisen mittauskammion jatkeeksi asennettiin 150 mm sisähalkaisijainen lieriö, jonka päähän tiivistettiin vastaavan kokoinen 200 mm korkea koekappale.

Muut irtoeristeet mitattiin uudemmalla laitteistolla. Ensin mittaukset tehtiin $300 \times 300 \times 300$ mm³ koekappaleilla sekä osin myös $600 \times 600 \times 600$ mm³ koekappaleilla, mutta myöhemmin mittaukset toistettiin eri puhalluskerralla valmistetuilla lieriöillä, joiden halkaisija ja korkeus oli noin 500 mm. Asennuskehysten pohjissa käytettiin verkkoa, jonka langan halkaisija oli noin 1,5 mm ja silmäkoko $8 \times 3,5$ mm². Koekappaleen todelliset korkeudet vaihtelivat melko paljon, koska tavoitetiheyteen puhallettu eriste saattoi olla niin löyhää, että se painui reilusti yli 10 % koekappaleen punnitusten ja mittauksen yhteydessä tehtyjen muiden siirtojen yhteydessä.

Puhalluksissa useita koekappaleita hylättiin ja eriste asennettiin kehyksiin uudelleen, jotta koekappaleille saavutettiin tiheyksiä, jotka olivat lähellä tavoitetiheyttä. Tiheimmät koekappaleet puhallettiin kotelopuhalluksena käyttäen asennuskehyksessä muovikantta, johon tehtiin puhallusletkulle sopiva läpivienti. Kaikki puhallukset tehtiin aina uudella paketista puhalletulla eristeellä, kertaalleen puhallettua eristettä ei puhallettu uudelleen. Puhalluslaitteen säädöt olivat urakoitsijan tekemät ja tutkijat eivät puuttuneet puhallukseen kuin koekappaleen puhallustiheyttä mittaamalla ja ohjeistamalla urakoitsijaa joko tiiviimpään tai löyhempään lopputulokseen.

3.2 Tutkitut materiaalit

Tutkitut materiaalit on kirjattu taulukkoon 1. Valitut materiaalit edustavat markkinoilla saatavilla olevia eristetuotteita. Kutterinlastun osalta tulokset edustavat ECOSAFE-hankkeissa tutkittuja kutterinlastu-laatuja [5] eivätkä siten todennäköisesti edusta esimerkiksi vanhoissa rakennuksissa käytettyjen purueristeiden arvoja. Materiaaleille ilmoitetut lämmönjohtavuudet on määritetty samasta eriste-erästä ja puhallettujen tuotteiden osalta samalla puhalluskerralla valmistetuista erillisistä koekappaleista.

Mittaukset pyrittiin tekemään valmistajien eri asennustilanteita varten ilmoittamissa tavoitetiheyksissä, mutta urakoitsijan tekemissä puhalluksissa jouduttiin hyväksymään tavoitteista poikkeavia koekappaleen tiheyden keskiarvoja, jos urakoitsija ei pystynyt puhaltamaan eristettä haluttuun tiheyteen.

4. Tulokset

4.1 Koekappaleen muodon ja mittauksen paine-eron vaikutus tuloksiin

Puhalluseristeiden koekappaleiden välillä oli selkeitä muuttujia, joiden vaikutusta tuloksiin haluttiin arvioida. Näitä oli tiheyden lisäksi koekappaleen muoto ja koko, tiheyden modifiointi ja mittauksen paine-ero. Variantteja ei toistettu systemaattisesti täysin samanlaisina kaikilla materiaaleilla, mutta vertailujen perusteella variantit vaikuttivat eri eristeissä samankaltaisesti. Puhalluseristeiden varianttien perusteella arvioitiin myös kutterinlastueristeiden tulosten luotettavuutta ja oikeaa mittaustapaa. Varianttien vaikutukset olivat jokseenkin selvästi yhdistettävissä materiaalin ilmanläpäisevyyden ja tiheyden riippuvuuteen; läpäisevämmillä eristeillä varianttien vaikutus poikkesi tiiviimmistä eristeistä.

Koekappaleen kokoa varioitiin 0,3 ja 0,6 m särmäisillä kuutioilla. Selkeää vaikutusta mittaustuloksiin ei havaittu missään tutkitussa erässä, joten reunavirheen vaikutus voitiin todeta varsin pieneksi. Muodolla sen sijaan oli vaikutusta ilmanläpäisevyyden kasvaessa; matalilla tiheyksillä ja siten suuremmilla ilmanläpäisevyyksillä lieriöiden mittaustulokset olivat lähes poikkeuksetta tiiviimpiä. Myös mittauksessa käytetyn paine-eron vaikutus tulokseen suureni huomionarvoiseksi kaikista läpäisevimmillä eristeillä, joskin matalampi paine-ero johti systemaattisesti korkeampiin ilmanläpäisevyyden arvoihin tapauksesta riippumatta. Tiiveimmillä ja tiheimmillä ilmanläpäisevyyksillä sekä muodon että mittauksen paine-eron vaikutus tulokseen oli marginaalinen.

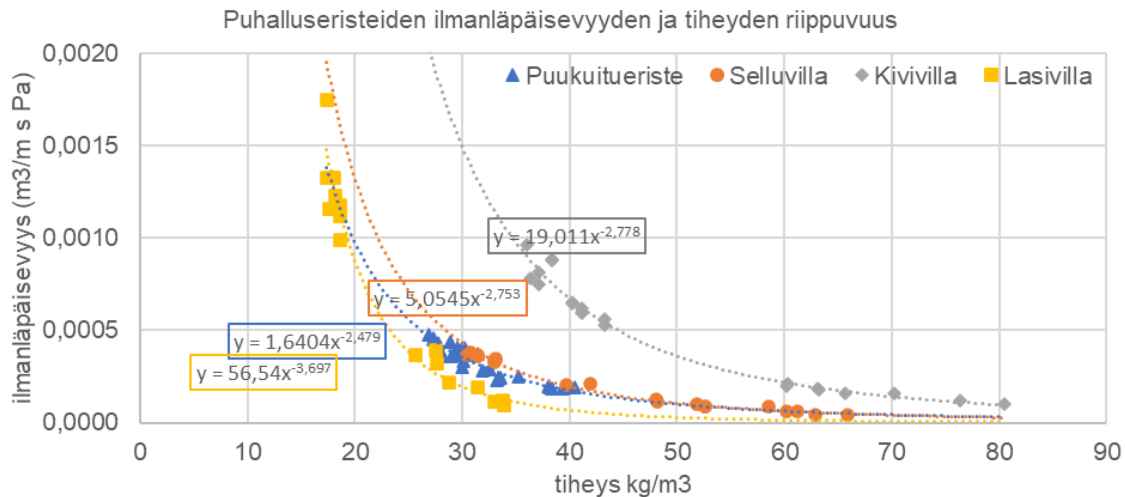
Tiheyden vaikutus mittaustulokseen oli odotetusti merkittävä. Koska puhalluksessa ei aina saavutettu haluttua tavoitetiheyttä, osa koekappaleista tiivistettiin yläpinnasta verkolla painamalla lähemmäs tavoitetiheyttä. Tällaiset koekappaleet mitattiin aina sekä ennen modifiointia että modifioinnin jälkeen. Vastaavaa modifiointia saatettiin tehdä koekappaleen yläpintaan myös siksi, että puhalluksessa joku osa koekappaleen yläpinnasta oli jäänyt merkittävästi eri korkeuteen muun koekappaleen kanssa. Näissä tapauksissa eristepinta tasoitettiin käsin ja työ tehtiin siten, että materiaalin rakenteeseen tulisi mahdollisimman vähän häiriötä. Tuloksissa nämä modifioidut ja originaalit koekappaleet erotettiin, mutta analyysin perusteella modifiointi ei synnyttänyt systemaattista virhettä ja siten myös modifioidut kappaleet ovat mukana lopputulosten laskennassa.

Läpäisevimmillä eristeillä matalan tiheyden tuloksissa oli nähtävissä voimakas ilmanläpäisevyyden nousu varsin pienellä tiheyden muutoksella. Samalla näiden eristeiden osalla matalimpia tavoitetiheyksiä oli vaikeinta saavuttaa. Mahdollisina syinä tähän pohdittiin olevan sekä puhalluslaitteen että puhallustekniikan säätäminen, joihin ei tässä tutkimuksessa puututtu, koska käytettiin sertifioitua puhallusurakoitsijaa. Mahdollisesti valmistajan ilmoittamien matalimpien tiheyksien saavuttaminen edellyttäisi esimerkiksi eristeen voimakkaampaa kuohkeutusta puhalluksen yhteydessä, mikä toisaalta saattaisi vaikuttaa edullisesti ilmanläpäisevyyden arvoon, vaikka tiheys alenee. Tähän kysymykseen yritetään löytää vastauksia käynnissä olevan Roof Convection -hankkeen kokeiden yhteydessä. Tämän hankkeen ilmanläpäisevyydsmittausten tuloksista on oma esitys Rakennusfysiikka 2023 seminaarissa [4].

4.2 Tiheysvaikutuksen laskenta

Irtoeristeiden mittauksissa sekä tavoitetiheydet että puhalluksessa toteutuneet tiheydet vaihtelivat suuresti ja aina tavoitetiheyttä ei saavutettu yrityksistä huolimatta. Tulokset haluttiin esittää valmistajien ilmoittamissa asennustapakohtaisissa tavoitetiheyksissä ja siksi tuloksille jouduttiin tekemään jälkilaskentaa.

Puhalluseristeiden lieriön muotoisten koekappaleiden ilmanläpäisevyyden mittaustulokset tiheyden funktiona on esitetty kuvassa 2. Tuloksista on havaittavissa, että tiheyden ja ilmanläpäisevyyden välillä vallitsee eksponentiaalinen riippuvuus. Tämän takia puhalluseristeiden osalta mittaustulokset laskettiin kaikkien kullakin eristeellä hyväksytyjen koekappaleiden avulla määritetyn tiheysfunktion avulla tavoitetiheyteen. Kutterinlastueristeiden osalta tiheysvaihtelu oli pienempää ja käytettiin lineaarista interpolointia tulosten laskentaan; lineaarinen interpolointi ei pienellä tiheyden vaihteluvälillä juurikaan eroa eksponentiaalisesta soviteesta. Lisäksi selkeimmissä tapauksissa tulokset ilmoitettiin mitattujen koekappaleiden mittaustulosten keskiarvona. Laskentatapa on esitetty taulukossa 1.



Kuva 2. Puhalluseristeiden lieriön muotoisilla koekappaleilla mitatut ilmanläpäisevyydet tiheyden funktiona sekä mittaustuloksiin tehty sovitefunktio.

4.3 Tulosten koonti

Suurien ilmanläpäisevyyksien vuoksi joillakin eristemateriaaleilla ei saavutettu korkeimpia paine-eroja, mutta korkea- ja matalapainemittausten tuloksia vertailemalla todettiin, että tällä tavalla saadut mittaustulokset johtavat alhaisempaan ja siten parempaan ilmanläpäisevyyden arvoon. Koska ongelma oli nimenomaan läpäisevimmillä materiaaleilla, katsottiin, että paremmaksi ilmoitettu ilmanläpäisevyyden arvo on eristeen näkökulmasta hyvä asia ja tulokset voidaan julkaista.

Aiemmissa luvuissa esitellyllä laskentatavalla saadut lopulliset tulokset on esitetty taulukossa 1. Kutterieristeellä tarkoitetaan seulomalla valmistettua kutterinlastua, jossa sekä pienet että suuret partikkelit on seulottu pois. Kutterieristeellä ja purulla puolestaan kutterieristeen tapaisesti valmistettua eristettä, josta on seulottu pois vain suuret partikkelit ja hienoainesta on noin 20 % puuaineksen kuivapainosta. Kutterinlastun savetuksessa savea on lisätty paino-osissa 1 savea 2 kutteria.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa mitattiin kattavasti markkinoilla saatavilla olevien eristetuotteiden ilmanläpäisevyyksiä julkaistavaksi RIL 225 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta -kirjaan [1]. Käytetyn koekappaleen muodolla havaittiin olevan merkittävä vaikutus irtoeristeiden mittaustulokseen. Lieriön muotoisilla kappaleilla mitattuja koetuloksia pidettiin luotettavampina, koska reuna- ja nurkkavaikutus jää niissä pinta-alaan suhteutettuna pienemmäksi. Mittauksessa koekappaleen yli vallitsevan paine-eron kasvaessa ilmanläpäisevyys tyypillisesti pieneni, mikä kertoo virtausvastuksen kasvusta suurilla ilmavirroilla.

Taulukko 1. Tutkitut materiaalit, tulokset ja mittauksen taustatiedot, levyeristeet.

Eriste- materiaali	Tavoite tiheys [kg/m ³]	Ilman läpäisevyys [10 ⁻⁶ m ³ /(msPa)]	Tiheyden vaihtelun huomiointi	Laite	Koekappale (a x b x h) tai d x h [mm]	Koekappa- leen valmis- tus
Levyeristeet	kohtisuoraan / kuitujen suuntaan					
Lasivilla	17	110 / 170	keskiarvo	vanh a	200 x 200 x 200 / 180 x 200 x 200	käs in leikkaamalla ehjästä levystä
Lasivilla	23	70 / 100				
Kivivilla	32	90 / 110				
Selluvilla	45	120 / 180				
Puukuitueriste	55	180 / 190				
Irtoeristeet						
Lasivilla, avoin	18	1300	eksp. sovite	uusi	525 x 550- 600	Sertifioitu puhaltaja valmiisiin kehyksiin
Lasivilla, kotelo	23	530				
Lasivilla, kotelo	30	200				
Kivivilla, avoin	40	390				
Kivivilla, kotelo	60	160				
Kivivilla, kotelo	70	110				
Selluvilla, avoin	33	250				
Selluvilla, kotelo	42	150	eksp. sovite	uusi	525 x 550- 600	Sertifioitu puhaltaja valmiisiin kehyksiin
Selluvilla, kotelo	60	70				
Puukuitu, avoin	30	360				
Puukuitu, kotelo	40	180	keskiarvo	vanh a	150 x 200	käs in sullomalla laitteen kehukseen
Kutteri, avoin	100	530				
Kutteri, kotelo	150	130				
Kutteri + puru, avoin	120	400				
Kutteri + puru, kotelo	180	80				
Savetettu kutteri, avoin	110	670	lin. sovite	keskiarvo		
Savetettu kutteri, kotelo	160	180				
Savetettu kutteri + puru, avoin	150	370				
Savetettu kutteri + puru, kotelo	260	60				

Tulosten perusteella puhallustekniikalla ja etenkin puhalluslaitteen säädöllä arvioitiin olevan merkittävä vaikutus saavutettuun tiheyteen ja asennuksen tasaisuuteen. Aiheeseen tehdään paraikaa jatkotutkimusta ja alustavia tuloksia on esitelty toisessa seminaariartikkelissa [4]. Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella sekä eristelaadulla, että tiheydellä voi yhdessä olla merkittävä vaikutus eristeen ilmanläpäisevyyteen, joka puolestaan korreloi eristekerroksen sisäisen konvektion todennäköisyyteen. Eristeiden ilmanläpäisevyyden vähentämiseen tulisikin kiinnittää huomiota lämmönjohtavuuden kehittämisen rinnalla.

Lähdeluettelo

- [1] RIL 225-2023 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta
- [2] SFS-EN ISO 9053-1:2018 Acoustics – Determination of airflow resistance – Part1: Static airflow method
- [3] SFS-EN 12114:2000 Thermal performance of buildings. Air permeability of building components and building elements. Laboratory test method.
- [4] S. Haapaniemi, J. Hietikko, E. Tuominen ja J. Vinha, Ilmanläpäisevyyden mittaustaite ja eräiden puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä. Rakennusfysiikka 2023
- [5] Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet – ECOSAFE- ja ECOSAFE 2 -hankkeiden loppuraportti 2023

Puhallettavien yläpohjaeristeiden sisäisen konvektion vaikutus niiden lämmöneristävyteen

Teemu Jokela, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa tutkittiin puhallettavien lämmöneristeiden sisäisen konvektion vaikutusta eristeiden lämmönläpäisykertoimeen ns. Calibrated Hot Box -menetelmällä. Tutkittavia yläpohjalämmöneristeitä olivat lasivilla, kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu. Kokeita tehtiin eri lämmöneristeen yli olevilla lämpötilaeroilla. Tutkimuksessa havaittiin, että kaikilla kolmella tutkitulla lämmöneristeellä tapahtui sisäistä konvektiota. Eniten sisäisen konvektion aiheuttamaa lämpövirran lisääntymistä tapahtui kutterinlastulla. Pelkkään johtumiseen verrattuna 300 mm paksulla lasivillakerroksella lämpövirta lisääntyi 20...70 % lämpötilaeron vaihdelta välillä 15...35 °C. Vastaavasti 600 mm paksulla kutterinlastulla lämpövirta lisääntyi 45...100 % lämpötilaeron vaihdelta välillä 15...35 °C ja 600 mm paksuisella savetetulla kutterinlastulla lämpövirta lisääntyi 10...65 % lämpötilaeroilla 15...35 °C. Tulosten perusteella kriittisen muunnetun Rayleighin luvun raja-arvoja pitäisi arvioida uudelleen, jotta sisäisen konvektion vaikutus tulisi otetuksi huomioon uudemman tutkimustiedon perusteella.

1. Johdanto

Puhallettavat yläpohjaeristeet ovat laajalti käytössä oleva lämmöneristetyyppi etenkin kustannustehokkaan asennustavan vuoksi. Puhallettavat eristeet koostuvat irtonaisesta materiaalista, joka puhallettaessa asettuu, materiaalista toki riippuen, löyhäksi kerrokseksi. Tällaisen lämmöneristekerroksen suhteellisen suuri ilmanläpäisevyys voi kuitenkin olla ongelma, sillä hyvin ilmaa läpäisevässä kerroksessa ilman liikkeet ovat mahdollisia, jolloin lämpöä siirtyy liikkuvan ilman mukana enemmän eristekerroksen läpi kuin pelkästään johtamalla siirtyisi. Tämä johtuu siitä, että lämmin ilma nousee nosteen vaikutuksesta ylöspäin kuljettaen mukanaan lämpöä, ja näin lisää siirtyvää lämpövirtaa yläpohjarakenteen läpi.

Aiemmissa Tampereen yliopistolla (ent. Tampereen teknillinen yliopisto) tehdyssä FRAME-projektissa [1] ja COMBI-hankkeen osana tehdyssä tutkimuksessa [2], tutkittiin sisäisen konvektion vaikutusta lasivillalla ja sellueristeellä, joiden perusteella sisäisen konvektion osuus kokonaislämpövirrasta voi olla hyvinkin merkittävä. Näiden tutkimusten perusteella on esitetty jatkotutkimustarpeita, ja nyt onkin meneillään uusi tutkimus, jossa tutkitaan entistä perusteellisemmin sisäisen konvektion vaikutusta yläpohjarakenteiden lämmönläpäisykertoimeen.

2. Tutkimusmenetelmät

2.1 Teoria

Tässä tutkimuksessa tehdyissä kokeissa tärkeimmät lämmön siirtymisen muodot ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Konvektion vaikutuksesta lämpöä siirtyy liikkuvan ilman mukana, jolloin pelkästään johtumiseen nähden lämpövirran suuruus kasvaa. Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan eristekerroksen sisällä ilman liikkeistä aiheutuvaa lämpövirran lisääntymistä pelkästään johtamalla laskettuun lämpövirran määrään nähden. Sisäistä konvektiota arvioidaan Nusseltin luvulla (kaava 1), joka kuvaa kokonaislämpövirran määrää, jossa on

johtuminen ja konvektio mukana, suhteessa pelkästään johtumalla laskettuun lämpövirtaan.

$$Nu = \frac{q_{cd} + q_{cv}}{q_{cd}} \quad (1)$$

missä Nu on Nusseltin luku, -

q_{cd} on lämpövirta johtumalla, W/m^2

q_{cv} on lämpövirta konvektiolla, W/m^2

Sisäisen konvektion syntymisen potentiaalia voidaan kuvata dimensiotoman muunnetun Rayleighin luvun avulla. Mitä suurempi luku on, sitä suurempi on potentiaali sisäisen konvektion syntymiselle. SFS-EN ISO 10456 [3] määrittelee muunnetun Rayleighin luvun kaavalla 2.

$$Ra_m = 3 \cdot 10^6 \frac{dk\Delta T}{\lambda} \quad (2)$$

missä Ra_m on muunnettu Rayleighin luku, -

d on lämmöneristeen paksuus, m

k on lämmöneristeen läpäisevyys, m^2

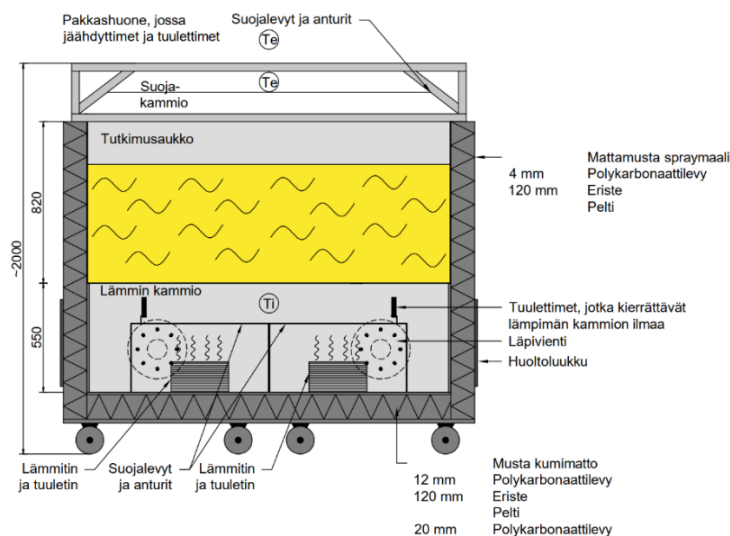
ΔT on lämmöneristeen eri puolien välinen lämpötilaero, K

λ on lämmöneristeen lämmönjohtavuus ilman konvektiota, $W/(m \cdot K)$

SFS-EN ISO 10456 [3] määrittelee kriittisen muunnetun Rayleighin luvun, jota pienemmillä arvoilla luonnollista konvektiota ei pitäisi tapahtua. Tämä luku on kyseisessä standardissa 15 yläpinnastaan avoimille rakenteille, joissa lämpövirta on alhaalta ylöspäin.

2.2 Yläpohjalaitteisto

Tämä tutkimus tehtiin yläpohjalaitteistolla, joka käyttää ns. Calibrated Hot-Box -menetelmää. Laitteisto on rakennettu standardin SFS-EN ISO 8990 [4] vaatimusten mukaan. Soveltuvien osien on myös käytetty standardia SFS-EN ISO 12567 [5]. Mittausaukon koko on 1,84 m x 2,73 m, ja siihen on asennettavissa enintään 800 mm paksu tutkittava materiaali. Havainnollistava kuva yläpohjalaitteesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Yläpohjalaitteen poikkileikkaus.

Yläpohjalaite koostuu kahdesta kammioista, lämpö- ja kylmäkammioista, joiden väliin tutkittava materiaalikerros asennetaan. Laite sijaitsee pakkahuoneessa, jonka koko on 4,0 m x 2,8 m x 2,5 m. Pakkahuoneen lämpötilaa säädetään kahden jäähdyttävän puhaltimen avulla tietokoneavusteisesti. Lämpökammion ilman lämpötilaa säädetään lämmittimillä, joita ohjataan myös tietokoneella. Yläpohjalaitteen yläreunassa suojakammion sisällä ovat tuulettimet, joilla voidaan luoda ilmavirtaa tutkittavan materiaalikerroksen yläpintaan simuloimaan tuuletusilmavirtaa.

Calibrated hot-box -menetelmää varten tarvitaan laitteiston kalibrointimenettely. Kalibroinnilla määritetään laitteiston vaipan läpi siirtyvä lämpövirta. Tätä kutsutaan laitteiston lämpöhäviöksi. Kalibroinnissa käytettiin XPS-elementtejä, joille määritettiin lämmönjohtavuudet lämpöhäviölaskentaa varten. Kalibrointielementtien kerrospaksuudet vastasivat tutkittavien materiaalien kerrospaksuuksia.

Tutkittavan materiaalikerroksen lämmönsiirtokerroin määritetään kerroksen yli menevän lämpötehon perusteella. Lämpöteho ($\Phi_{\text{rak}} (W)$) tutkittavan kerroksen yli lasketaan kokonaislämpötehon ja häviötehon erotuksena. Lämmönsiirtokerroin tutkittavalle materiaalikerrokselle lasketaan kaavalla $U = \Phi_{\text{rak}} / (A \cdot \Delta T)$, jossa A on tutkimusaukon pinta-ala (m^2) ja ΔT on lämpötilaero (K) tutkittavan eristekerroksen pintojen välillä.

Tässä tutkimuksessa kokeet suoritettiin sekä ilman tuuletusilmavirtaa että tuuletusilmavirralla eristeen yläpinnassa. Tuuletusilmavirran nopeudeksi pyrittiin asettamaan 0,6 m/s laitteiston yläreunassa, mutta 300 mm paksun tutkittavan eristekerroksen yläpinnan lähellä ilmavirran nopeus oli n. 0,4 m/s, joka johtui ilmavirran turbulentsisuudesta eristekerroksen yläpinnan ollessa melko matalalla tuulettiin nähden.

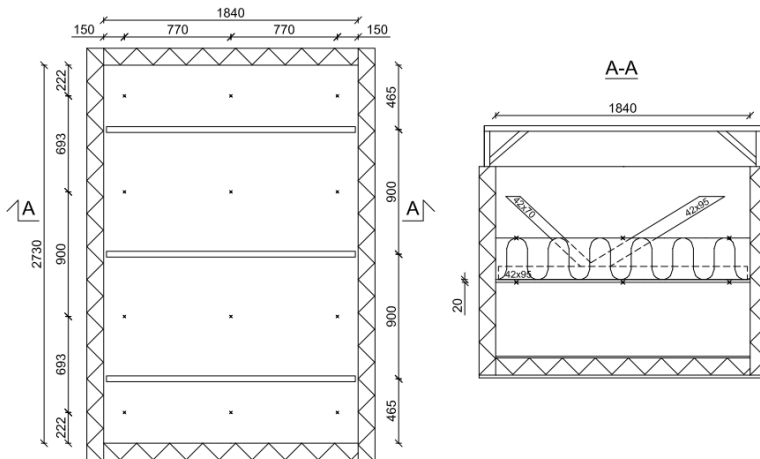
Kaikkia kokeita mitattiin vähintään 8 tuntia, kun tasaantuneet olosuhteet oli saavutettu. Kaikki laskennassa käytetyt arvot on otettu tältä tasaantuneelta ajanjaksolta. Kutterinlastueristeiden tasaantuminen kesti pitkään, ja osa mittauksista jouduttiin hylkäämään, sillä jälkikäteen tehdyn tarkastelun perusteella olosuhteet eivät olleet tasaantuneet kaikissa tapauksissa vielä riittävästi.

2.3 Tutkittavat rakenteet ja koeolosuhteet

Tässä tutkimuksessa tutkittiin tähän mennessä kolmea eri lämmöneristemateriaalia. Käytetyt materiaalit olivat lasivilla, kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu. Lasivillan eristepaksuus oli n. 300 mm ja kutterinlastueristeiden n. 600 mm. Tutkittavan eristeen alla oli 20 mm paksu vaneri. Yläpohjalaitteessa oli myös asennettuna kattoristikot, jotta tilanne vastaisi mahdollisimman paljon todellisuutta, sillä kattoristikoiden paarteilla voi olla vaikutusta ilmavirtauksiin eristeen sisällä.

Lämpötila-antureita asennettiin sekä lämpö- että kylmäkammioon. Tämän lisäksi eristeen sisä- ja ulkopinnoilla oli lämpötila-anturit, kuten myös tutkittavan rakenteen sisäpinnalla. Kuva ristikosta ja anturoinneista on esitetty kuvassa 2.

Koeolosuhteet olivat tavoitelämpötilojen osalta lämpökammiossa +20 °C ja pakkahuoneessa -15 °C, 0 °C, +5 °C, +10 °C ja +15 °C. Mittaustulosten tämänhetkisestä epävarmuudesta pienissä lämpötilaeroissa johtuen, pakkahuoneen lämpötilojen +10 °C ja +15 °C osalta tuloksia ei raportoida.



Kuva 2. Yläpohjalaitteen mitat ja anturointi.

Tutkittavien rakenteiden lämmönläpäisykertoimet pelkästään lämmönjohtuminen huomioon otettuna laskettiin Comsol Multiphysics 6.1 -laskentaohjelmalla. Koetilanteen rakenne tehtiin laskentaohjelmaan kolmiulotteisena, joten myös ristikot on otettu huomioon.

2.4 Materiaaliominaisuudet

Koemateriaalien lämmönjohtavuudet mitattiin FOX304-lämpövirtalaitteella standardien EN 12664 [6] ja EN 12667 [7] mukaan vastaavissa keskimääräisissä lämpötiloissa kuin itse yläpohjakokeet suoritettiin. Lämmönjohtavuuskoekappaleet tehtiin samasta puhalluserästä kuin yläpohjalaitteessa oleva eriste, jolloin myös materiaalien kosteuspitoisuudet olivat samasta lähtötilanteesta. Eriste puhallettiin lämmönjohtavuuskoekappaleisiin samalla menetelmällä kuin yläpohjalaitteeseen. Myös materiaalien ilmanläpäisevyydet mitattiin. Lasivillan ilmanläpäisevyys oli $1300 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{msPa})$, kutterinlastun $900 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{msPa})$ ja savetetun kutterinlastun $1000 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{msPa})$. Ilmanläpäisevyyksien arvot vastasivat yläpohjalaitteessa olevia asennustiheyksiä.

Tutkittavien materiaalien mitatut lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 1.

Lämmönjohtavuuskokeissa esiintyi epävarmuutta lämpövirtalaitteen alalevylle tiivistyneen kosteuden vuoksi. Jälkikäteen huomattiin laitteessa oleva vika, josta aiheutui ylimääräistä kondenssivettä alalevylle. Uusia mittauksia tähän artikkeliin ei kuitenkaan ehditty tekemään. Tämä on aiheuttanut lämmönjohtavuuksiin suurempia arvoja, kuin todellisuudessa lämmönjohtavuus olisi, ja tämä koskee etenkin pienimpiä keskimääräisiä lämpötiloja. Suurimmillaan tästä aiheutunut virhe on likimain luokkaa 10 %. Tulosten kannalta tämä tarkoittaa sitä, että lasketut Nusseltin luvut olisivat mahdollisesti vielä suurempia.

Taulukko 1. Tutkittavien materiaalien lämmönjohtavuudet.

Keskimääräinen lämpötila (°C)	Lämmönjohtavuus (W/(m·K))		
	Lasivilla	Kutterinlastu	Savetettu kutterinlastu
2,5	0,0482	0,0439	0,0484
10	0,0520	0,0459	0,0510
12,5	0,0524	0,0471	0,0525
15	0,0529	0,0486	0,0548
17,5	0,0535	0,0515	0,0586

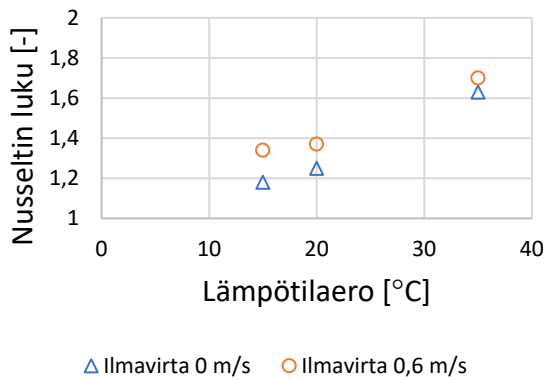
Lasivillan asennustiheys yläpohjalaitteessa oli $15,13 \text{ kg/m}^3$. Lämmönjohtavuuskokeissa lasivillan tiheydeksi muotteihin ei saatu täysin vastaavia arvoja, mutta regressioanalyysin avulla mittaustuloksista on arvioitu asennustiheyttä vastaava lämmönjohtavuus. Samoin tehtiin kutterinlastun ($88,84 \text{ kg/m}^3$) ja savetetun kutterinlastun ($94,55 \text{ kg/m}^3$) osalta.

3. Tulokset

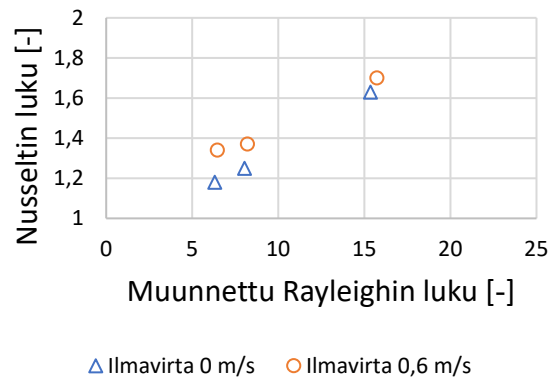
Kuvaan 3 on koottu tutkimuksen keskeisiä tuloksia. Lasivillalla konvektio lisäsi lämpövirtaa n. 70 %, kun lämpötilaero eristekerroksen yli oli 35 °C. Vielä 15 °C erolla sisäinen konvektio lisäsi lämpövirtaa n. 20–35 % riippuen tuuletusilmavirrasta. Kutterinlastulla konvektion lisäämä lämpövirta oli suurinta, ollen n. 100 %, kun lämpötilaero oli 35 °C. Myös 15 °C erolla tapahtui vielä selkeää sisäistä konvektiota, jolloin lämpövirran lisäys oli n.40–70 % tuuletusilmavirrasta riippuen. Savetetulla kutterinlastulla sisäistä konvektiota tapahtui vielä hiukan vähemmän kuin lasivillalla. 15 °C lämpötilaerolla sisäinen konvektio lisäsi lämpövirtaa vain 10–15 %.

Lasivilla 300 mm

a)

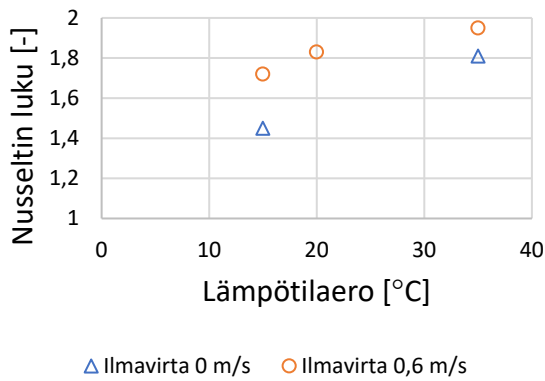


b)

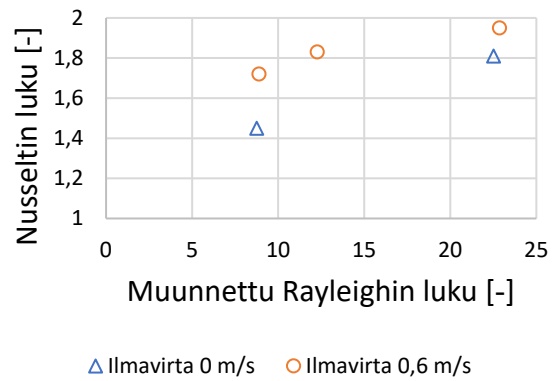


Kutterinlastu 600 mm

c)

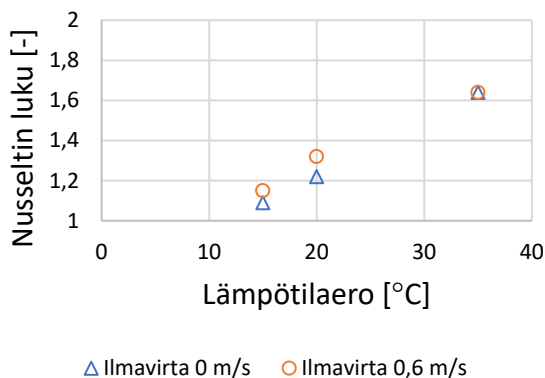


d)

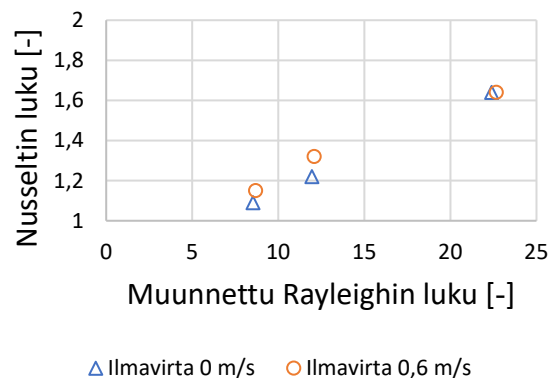


Savetettu kutterinlastu 600 mm

e)



f)



Kuva 3. Tulokset rakenteista sisäisen konvektion ja muunnetun Rayleighin luvun osalta.

Tulosten perusteella lämpötilaero rakenteen pintojen välillä vaikuttaa voimakkaasti sisäisen konvektion määrään. Suurempi lämpötilaero rakenteen pintojen välillä kasvattaa sisäisen konvektion aiheuttamaa lämpövirtaa rakenteen läpi.

4. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tutkittiin kolmella eri yläpohjan lämmöneristemateriaalilla sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen lämmönläpäisykertoimeen. Kaikissa tutkittavissa rakenteissa tapahtui mittausten perusteella selvää sisäistä konvektiota eristekerroksen yli olevilla lämpötilaeroilla 15...35 °C. Mittausten perusteella sisäinen konvektio kasvatti lämpövirtaa rakenteen läpi jopa 100 % pelkkään johtumiseen verrattuna.

Sisäinen konvektio riippuu voimakkaasti rakenteen eri puolten välisestä lämpötilaerosta. Tämän vuoksi juuri kylmissä olosuhteissa, joissa rakennusten lämmitysenergian tarve on suurimmillaan, sisäisen konvektion vaikutus on suurta. Tämän vuoksi sisäisen konvektion vähentäminen olisi tärkeää suunnitteluratkaisuissa.

Tutkimuksen tulosten perusteella kriittisen muunnetun Rayleighin luvun raja-arvoa olisi syytä harkita muutettavaksi, jotta sisäisen konvektion aiheuttama lämpövirran lisäys tulisi otettua huomioon nykyistä paremmin. Tämä olisi yksi keino päästä energiatehokkaampiin ratkaisuihin uusimman tutkimustiedon perusteella.

Lähdeluettelo

- [1] 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, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.
- [2] Henna Kivioja & Juha Vinha (2020) Hot-box measurements to investigate the internal convection of highly insulated loose-fill insulation roof structures. *Energy and Buildings*, Vol. 216, June 2020.
- [3] SFS-EN ISO 10456:2007. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.
- [4] EN ISO 8990:1996. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box.
- [5] EN ISO 12567:2010. Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. Part 1: Complete windows and doors.
- [6] EN 12664:2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance.
- [7] EN 12667:2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance.

Tuulettuvien yläpohjien kosteustekninen toiminta kenttäkokeissa

Jaakko Hietikko, Kaapo Yletyinen, Ilkka Valovirta, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Oikein toteutetut tuulettuvat yläpohjat ovat olleet varmatoimisia Suomen ilmastossa. Ilmastonmuutoksen eteneminen sekä rakentamistapojen muuttuminen, erityisesti lämmöneristepaksuuksien kasvu, edellyttävät kuitenkin niiden toimintaedellytysten ja toteutustapojen uudelleenarviointia. Tampereen yliopistolla on toteutettu puurakenteisten, tuulettuvien yläpohjien kenttätutkimus osana Future Spaces -tutkimushanketta. Kenttätutkimuksissa on verrattu eri aluskateratkaisuilla ja lämmöneristeillä sekä erilaisilla painovoimaisen tuuletuksen ratkaisuilla toteutettuja rakenteita. Tavoitteena on ollut etsiä nykyilmastossa parhaiten toimivat ratkaisut, joiden on syytä olettaa toimivan parhaiten myös tulevaisuudessa. Koerakenteita on ollut seurannassa yhteensä kuusi kappaletta. Rakenteissa on käytetty lämmöneristeenä puhallettua kivivillaa sekä selluvillaa ja aluskatteina tavanomaista kalvoaluskatetta sekä 30 mm XPS-levyä. Jälkimmäisellä on tavoiteltu yläpohjan tuuletustilan lämpötilan nostoa kirkkaina öinä, jolloin yläpohjissa todennäköisimmin esiintyy kondenssia. Kahden rakenteen tuuletustilan ilmanvaihtoa on rajoitettu käyttämällä ilmareitteinä tuuletusputkia muissa rakenteissa käytettyjen tuuletusrakojen sijasta. Tulosten perusteella yläpohjien tuuletustilojen ilmanvaihtuvuudella oli merkittävin vaikutus tuuletustilan olosuhteisiin, joskin erot eri rakenteiden välillä olivat varsin pieniä. Kaikki rakenteet toimivat rakennusfysikaalisesti moitteettomasti, mutta rajoitetun ilmanvaihdon tapauksissa suhteelliset kosteudet olivat verrokkirakenteita alhaisempia.

1. Johdanto

Tuulettuissa yläpohjissa on havaittu laajalti homevaurioita mm. Etelä-Ruotsissa [1,2]. Ongelmien syy on kostean tuuletusilman jäähtyminen yläpohjan tuuletustilassa, mistä seuraa vesihöyryn kondensoitumista, homevaurioita ja jopa lahoa. Suomen ilmaston ennustetaan muuttuvan tulevaisuudessa rakennusfysikaalisesti haastavammaksi, joten mahdollisuudet vastaavanlaisten ongelmien esiintymiseen sekä niiden torjumiseen on syytä selvittää. Rakenteiden lämmöneristespaksuudet ovat lisäksi kasvaneet vaatimusten kiristämisen myötä siinä määrin, ettei yläpohjan läpi johtuva hukkalämpö enää lämmitä yläpohjarakenteita kuten ennen. Tämä lisää kondenssin ja homeenkasvun mahdollisuutta yläpohjissa, etenkin mikäli rakenne ei ole optimaalinen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa.

Future Spaces -hankkeen puitteissa on tutkittu sekä tyypillisiä nykyrakentamiskäytännön mukaisia yläpohjarakenteita että niiden variaatioita, joissa rakennusfysikaalista toimintaa on pyritty parantamaan. Alustavia tuloksia on raportoitu vuoden 2021 Rakennusfysiikkaseminaarissa [3]. Mittaukset aloitettiin elokuussa 2021 ja tässä artikkelissa on seurattu mittausten kulkua elokuuhun 2023 asti.

2. Tutkimusfasiliteetit ja tutkitut rakenteet

2.1 Koerakennukset

Tutkimuksessa käytetyt yläpohjaelementit asennettiin kahteen Tampereen Hervannassa sijaitsevaan koerakennukseen. Molemmat koerakennukset ovat suorakulmion muotoisia ja niiden kokonaispinta-ala on noin 49 m², pidemmän julkisivun ollessa 12,2 metriä ja lyhyemmän 4,0 metriä. Kummassakin koerakennuksessa on 3 osastoa, joista jokaisen päällä on paikka yläpohjaelementille. Koejärjestely on kuvattu vuoden 2021 Rakennusfysiikkaseminaarin esityksessä [3].

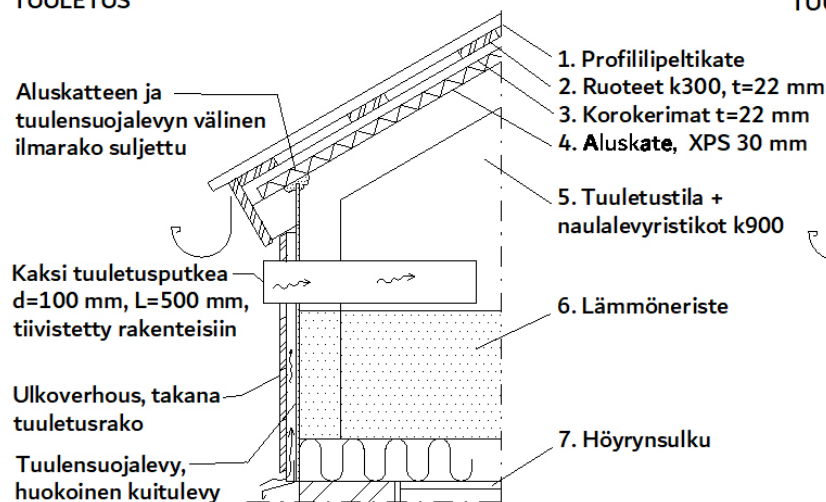
2.2 Rakennetyypit

Kaikki tutkittavat yläpohjaelementit ovat puuristikkorakenteeltaan samanlaisia. Elementeistä yhteensä neljä kappaletta oli eristetty kivivillalla. Näistä kaksi oli rajoitetun ilmanvaihdon elementtejä. Toiset kaksi toteutettu tavanomaisella ilmanvaihdolla, eli alaräystäillä ja harjalla sijaitsevilla tuuletusraoilla. Tavanomaisesti tuuletettujen elementtien erona oli aluskaterakenne, joka oli toisessa kalvomainen ja toisessa kevyesti lämmöneristetty. Lämmöneristettynä aluskatteena käytettiin 30 mm XPS-levyä. Rajoitetun ilmanvaihdon elementeissä ilmanvaihto oli toteutettu halkaisijaltaan 100 mm ilmanvaihtoputkilla, joita on yhteensä 6 kpl. 500 mm pitkistä ilmanvaihtoputkista neljä oli sijoitettu räystäiden alapuolelle, 2 kpl / rakennuksen sivu, ja kaksi harjalle. Rajoitetun ilmanvaihdon yläpohjat olivat rakenteiltaan yhteneväiset, mutta ne oli sijoitettu eri koerakennuksiin.

Selluvillaeristettyjä yläpohjaelementtejä oli kaksi kappaletta, joista toisessa perinteinen kalvomainen aluskate ja toisessa kevyesti lämmöneristetty aluskate kuten tavanomaisesti tuuletetuissa kivivillaelementeissäkin. Yläpohjien rakenne on esitetty kuvassa 1.

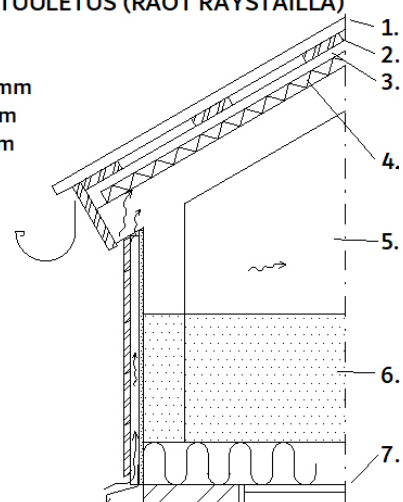
DET. 1

XPS-ALUSKATE, RAJOITETTU
TUULETUS



DET.2

XPS-ALUSKATE, NORMAALI
TUULETUS (RAOT RÄYSTÄILLÄ)



Kerrokset 1.-7. kuten detaljissa 1

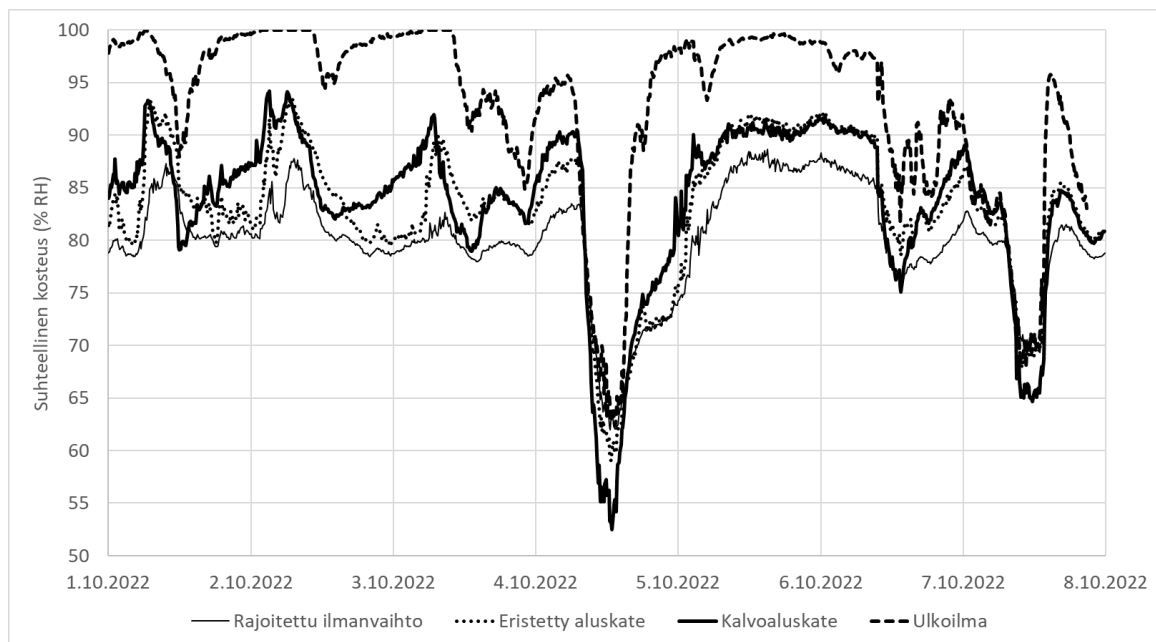
Kuva 1. Yläpohjarakenteet sivuräystään kohdalta esitettynä. Detaljissa 1 rajoitetun tuuletuksen elementtien rakenne. Detaljissa 2 normaalisti tuuletettu, XPS-aluskatteella varustettu elementti. Kalvoaluskatteella varustetut elementit ovat samanlaisia kuin detaljissa 2 on esitetty, ainoana poikkeuksena aluskatekerros.

2.3 Mitatut suureet

Rakenteista mitattiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta jatkuvatoimisella mittauksella useista eri kohdista. Mittauspisteitä on sekä yläpohjan tuuletustilassa että lämmöneristeen sisällä. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksista saadaan laskettua homeindeksi. Rajoitetun ilmanvaihdon elementeistä mitattiin lisäksi ilmavirran nopeus tuuletusputkissa. Tämä mahdollistaa tuuletustilan ilmanvaihtuvuuden arvioimisen. Osassa elementeistä mitattiin lisäksi ilmanvaihtuvuutta kertaluontoisilla mittauksilla merkkiainemenetelmää käyttäen. Ulkolämpötilaa ja -kosteutta mitattiin koerakennusalueelle auringonpaisteelta suojaan sijoitetuilla Vaisala HMP110 -antureilla.

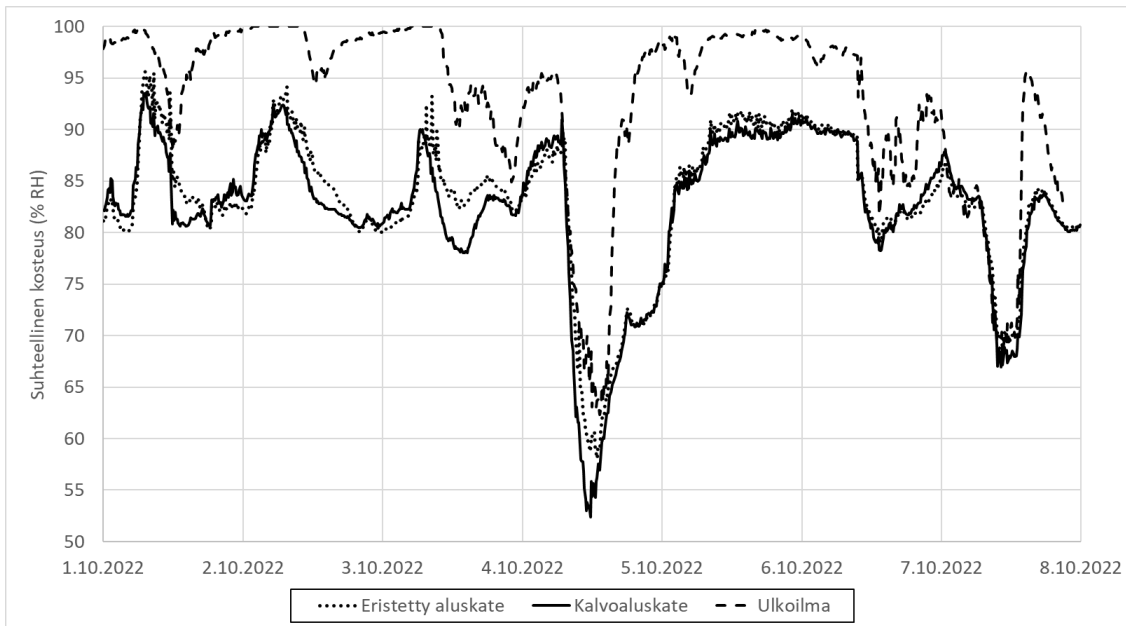
3. Tulokset

Syksy on todettu yläpohjarakenteiden kannalta haastavaksi vuodenajaksi. Tällöin ulkoilman suhteellinen kosteus on tyypillisesti korkea ja lämpötila ajoittain riittävän korkea homeenkasvun kannalta. Kaikissa tutkituissa rakenteissa tuuletustilojen suhteellinen kosteus pysyi pääosin ulkoilman suhteellista kosteutta alemmalla tasolla. Kuvat 2 ja 3 havainnollistavat eri rakenteiden tuuletustilan suhteellisen kosteuden muutoksia yhden viikon jaksolla [4].



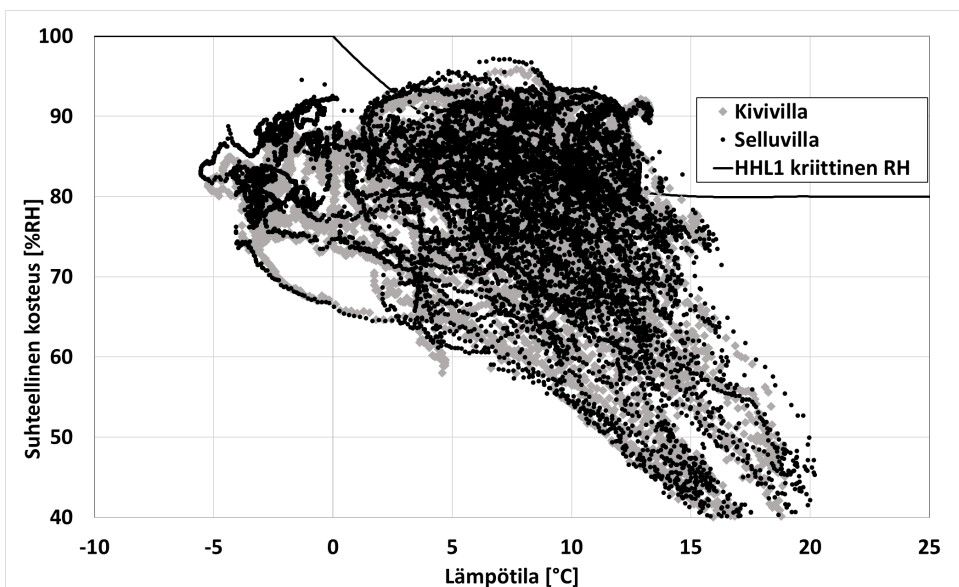
Kuva 2. Mineraalivillalla eristettyjen rakenteiden tuuletustilan suhteellisen kosteuden vaihtelu sekä ulkoilman suhteellinen kosteus verrokkina.

Kuvasta 2 nähdään kalvoaluskatteella varustetun rakenteen suhteellisen kosteuden olevan useimmiten muita rakenteita korkeammalla tasolla, ja rajoitetulla ilmanvaihdolla varustetun puolestaan muita alhaisemmalla tasolla. Eri rakenteiden reagointi suhteellisen kosteuden muutoksiin näkyy hyvin esimerkiksi 4.-5.10.2022 välisenä yönä, jolloin ulkoilman kosteus nousee erittäin nopeasti arvosta 52 % lähelle sataa prosenttia. Kalvoaluskate reagoi muutokseen nopeimmin ja rajoitetulla tuuletuksella varustettu rakenne hitaimmin. Viimeksi mainitussa suhteellinen kosteus vakiintuu kahta muuta rakennetta alemmalle tasolle. Kuva 3 kertoo selluvillaeristeisten yläpohjien tuuletustilojen suhteellisen kosteuden olevan likimain samaa tasoa kuin mineraalivillalla eristettyjen. On ilmeistä, että ilmanvaihtotavalla on tässä koeasetelmassa suurempi merkitys kuin selluvillan hygroskooppisuudella tai myöskään aluskatetyypillä.

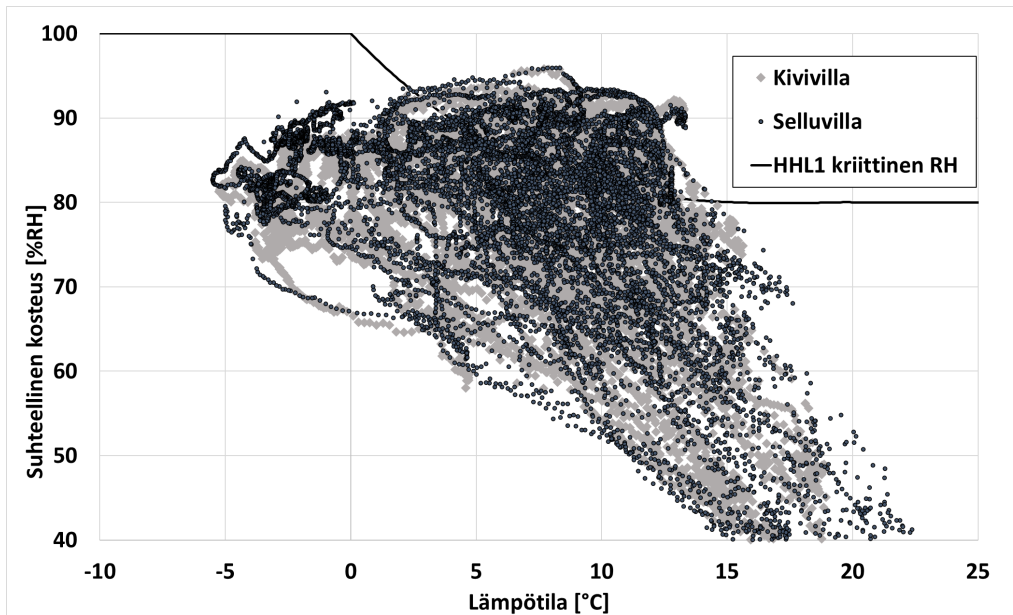


Kuva 3. Selluvillalla eristettyjen rakenteiden tuuletustilan suhteellisen kosteuden vaihtelu sekä ulkoilman suhteellinen kosteus verrokkina.

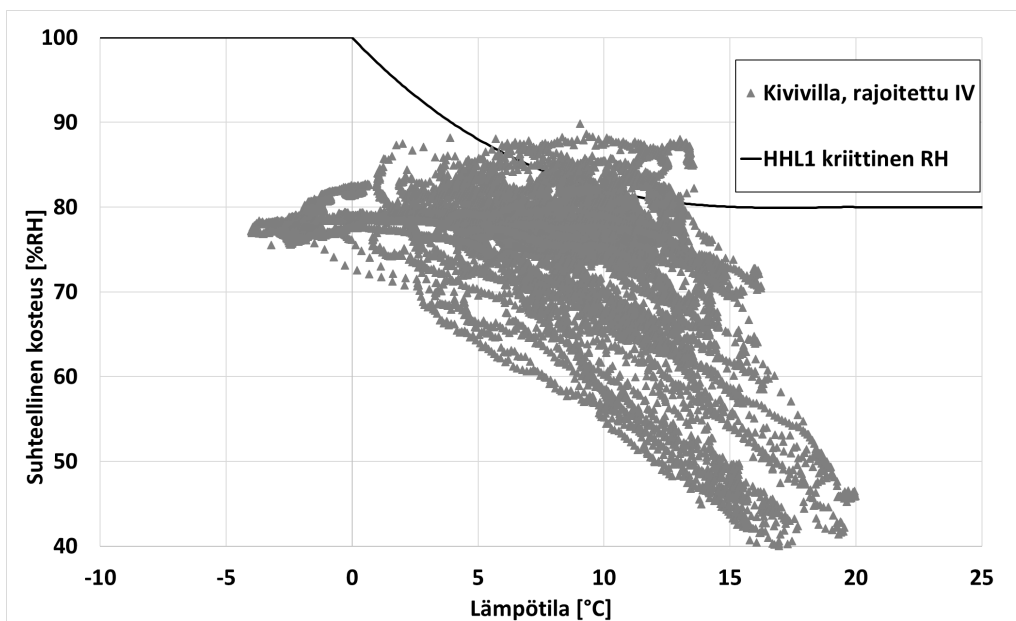
Rakenteiden toimintaa havainnollistavat pistepilvikuvaajat, joissa on esitetty mittausjaksolla mitatut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot yksittäisinä pisteinä. Vertailemalla mittauspisteiden sijainteja homeenkasvulle kriittisten olosuhteiden raja-arvokäyrään nähdään, minkä verran missäkin rakenteissa esiintyy homeenkasvulle otollisia olosuhteita. Runsaskaan mittauspisteiden esiintyminen raja-arvokäyrän yläpuolella ei välttämättä merkitse homeenkasvun alkua, koska homeenkasvu vaatii alkaakseen pitkän, yhtenäisen suotuisten olosuhteiden ajanjakson. Kuvista 4...6 nähdään, että rajoitetun ilmanvaihdon tilanteessa (kuva 6) huomattavan suuri osa mittauspisteistä on homeenkasvun raja-arvokäyrän alapuolella eli poissa homeenkasvun kannalta suotuisalla alueella. Tällaisessa rakenteessa on varmuutta ajatellen tulevaisuuden nykyistä lämpimämpää ilmasto [5], missä mittauspisteet siirtyvät oikealle ja ylöspäin.



Kuva 4. Lämpötila- ja kosteusolosuhteet syysjaksolta 1.9.-30.11.2022 mitattuna. Rakenteina kivi- ja selluvillaeristeiset yläpohjat, joissa on lämpöä eristävä aluskate ja normaali ilmanvaihto.

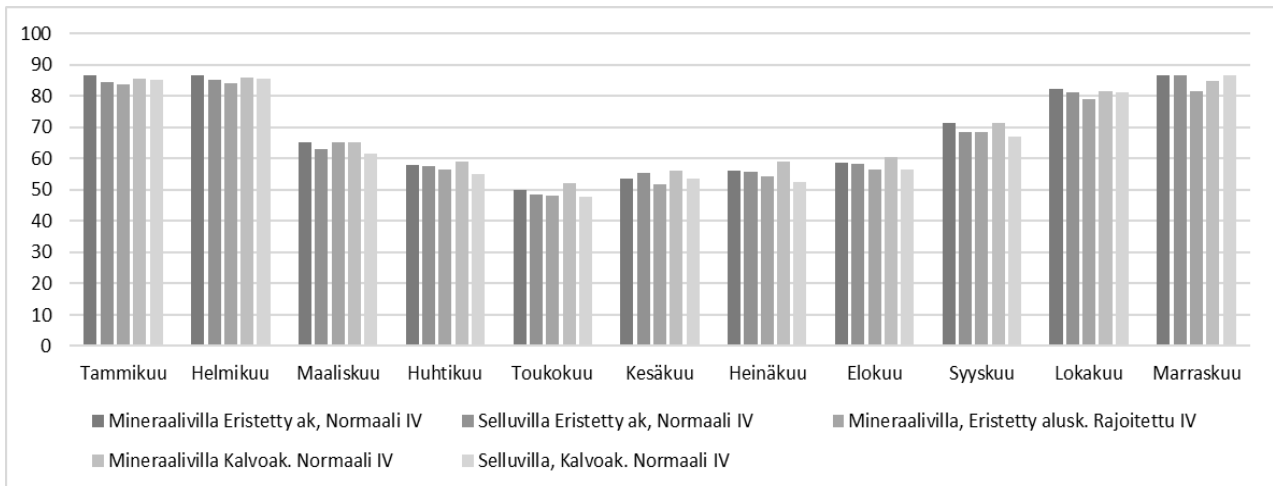


Kuva 5. Lämpötila- ja kosteusolosuhteet syysjaksolta 1.9.-30.11.2022 mitattuna. Rakenteina kivi- ja selluvillaeristeiset yläpohjat, joissa on kalvoaluskate ja normaali ilmanvaihto.



Kuva 5. Lämpötila- ja kosteusolosuhteet syysjaksolta 1.9.-30.11.2022 mitattuna. Rakenteena kivivillaeristeinen yläpohja, jossa on kalvoaluskate ja rajoitettu ilmanvaihto.

Kaikki tutkitut rakenteet toimivat nykyilmastossa hyvin, kun kriteereinä käytettiin homeindeksiä sekä kosteuden tiivistymistä eli kondenssia. Homeindeksit eivät nousseet mittauspisteissä yli arvon 1,0, mikä on mikroskoopilla havaittavan homeenkasvun raja. Kosteuden tiivistymistä ei havaittu yhdessäkään mittauspisteessä. Rakenteiden toimintaa eri vuodenaikoina on pyritty kuvaamaan taulukossa 1 esitettyjen tuuletustilan suhteellisten kosteuksien kuukausikeskiarvojen avulla. Lukuarvojen erot eri rakenteiden välillä ovat pieniä, mutta loka-helmikuulla rajoitetun ilmanvaihdon elementti erottuu edukseen.



Kuva 6. Suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot. Ak = aluskate ja IV = ilmanvaihto.

4. Yhteenveto

Merkittävimmät erot eri rakenteiden välille muodosti ilmatilojen tuuletus, joskaan rajoitetulla tuuletuksella varustetun rakenteen erot verrokkeihin eivät olleet dramaattisia. Aluskate- ja lämmöneristevariaatioiden välille ei muodostunut merkittäviä eroja. Niiden vaikutus saattaisi korostua rajoitettaessa kaikkien tutkittavien yläpohjien tuuletusta. Hyvin tuuletetuissa rakenteissa aluskatteen ja lämmöneristetyypin rooli jää melko vähäiseksi. Rajoitetulla tuuletuksella varustetuissa rakenteissa ilman suhteellisen kosteuden arvot ja sitä myöten homeindeksin arvot olivat hieman alhaisempia kuin tehokkaasti tuuletettujen rakenteiden.

Johtopäätöksenä voidaan todeta tuuletuksen rajoittamisen olevan potentiaalinen keino parantaa rakenteiden toimintaa tulevaisuuden ilmastossa. Aihepiiri vaatii jatkotutkimuksia. Tämä tutkimus on tehty tehokkaalla yläpohjien lämmöneristyksellä varustetuissa rakennuksissa, joissa mm. yläpohjien ilmatiiviuteen on kiinnitetty erityistä huomiota. Erityisesti vanhemmassa rakennuskannassa tuuletuksen rajoittaminen vaatisi vähintäänkin yläpohjien ilmatiiviuden varmistusta sekä mahdollisesti lisälämmöneristystä, riippuen lähtötilanteesta. Näin voidaan välttää katolle kertyvän lumen sulamisen sekä yläpohjan ilmavuotojen aiheuttamia ongelmia.

Lähdeluettelo

- [1] V. M. Nik, A. Sasic Kalagasidis, ja E. Kjellström, ”Assessment of hygrothermal performance and mould growth risk in ventilated attics in respect to possible climate changes in Sweden”, *Build. Environ.*, vsk. 55, ss. 96–109, syys 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.024.
- [2] C.-E. Hagentoft ja A. S. Kalagasidis, ”Drying Potential of Cold Attic Using Natural and Controlled Ventilation in Different Swedish Climates”, *Procedia Eng.*, vsk. 146, ss. 2–7, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.345.
- [3] E. Tuominen, J. Hietikko, ja J. Vinha, ”Mineraalivillaeristeisten yläpohjien koerakennuskokeet Future Spaces -hankkeessa”, teoksessa *Rakennusfysiikka 2021 -seminaari*, Tampere 26.-28.10.2021, Tampere, 2021.
- [4] K. Yletyinen, ”Tuulettuvien yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta. (Julkaisematon luonnos).”, Diplomityö, Tampereen yliopisto, 2023.
- [5] K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Mäkelä, R. Hyvönen, P. Pirinen, ja I. Lehtonen, ”Rakennusfysiikan testivuosi sääaineistot havaitussa ja arvioitussa tulevaisuuden ilmastossa. FMI Report 2013:1”, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, 2013.

B3. Ulkovaipparakenteiden ilmatiiveys

Tuulensuojalevyn lämmöneristävyiden ja höyrinsulkukerroksen ilmatiiviiden vaikutus massiivipuulevyrunkoisen ulkoseinän ja välipohjan liittymän rakennusfysikaaliseen toimivuuteen

Santeri Tammi
Ramboll Finland Oy

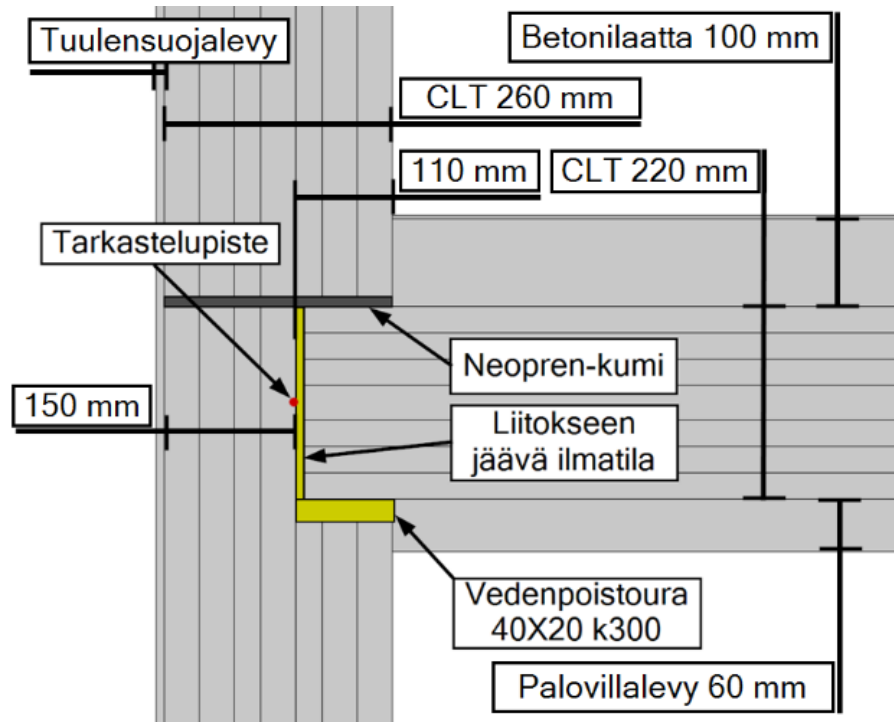
Tiivistelmä

Artikkelissa tarkastellaan tuulensuojalevyn lämmöneristävyiden vaikutusta sekä höyrinsulkukerroksen ilmatiiveyden vaikutusta CLT-runkoisen ulkoseinärakenteen ja CLT-betoniliittovälipohjan liittymän rakennusfysikaaliseen toimivuuteen. Tutkimus koostuu numeerisesta lämpölaskentaosuudesta, liittymän sisäisestä kosteuden kondensoitumistarkastelusta ja homemallitarkastelusta. Tuulensuojalevyn lämmöneristävyiden vaikutus tarkastettiin kuudella eri lämmönvastuksella alkaen tuulensuojakipsilevystä ja päättyen 70 mm paksuun mineraalivillapohjaiseen tuulensuojalevyyn. Sisäilman kosteuslisän vaikutusta tarkasteltiin kolmella kosteuslisän arvolla. Tulosten perusteella liittymässä, johon kohdistuu ilmavuotoa sisäilmasta, on merkittävä riski liittymän sisäiselle kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle sisäilman kosteusluokalla kaksi. Vastaavasti sisäilman kosteusluokalla kolme, sekä tuoreisiin tutkimustuloksiin perustuvilla arvoilla ($3...2 \text{ g/m}^3$) kondensoitumisen riski on vähäinen ja häviää lähes kokonaan, kun tuulensuojakipsilevy vaihdetaan lämpöä eristävään tuotteeseen. Liittymän epätiiveydestä seuraava homeen kasvun riski on läsnä kaikilla tutkimuksessa käytetyillä kosteuslisän arvoilla.

1. Johdanto

Artikkeli perustuu 11.5.2022-24.11.2022 tehtyihin kenttämittauksiin ja laskentatarkasteluihin, joissa tutkittiin rakennusvaiheen vaikutusta CLT-runkoisen kerrostalon ulkoseinä- ja välipohjaliittymän rakennusfysikaaliseen toimivuuteen tapaustutkimuskohteen avulla [3]. Tutkimuksen yhtenä osuutena tarkasteltiin laskennallisesti sisätilojen puolelta epätiiviin liittymän toimivuutta kosteuden kondensoitumisen näkökulmasta. Tarkasteluja laajennettiin tässä artikkelissa niin, että tarkasteltiin CLT-rungon kylmälle puolelle lisättävän lämpöä eristävän tuulensuojalevyn vaikutusta kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun todennäköisyyksiin liittymän sisällä.

Tutkittava liittymä ja rakenteet on esitetty kuvassa 1. Liittymässä sijaitsee vedenpoistourat, joita pitkin liittymään rakennusvaiheessa päätyvä vesi pääsee kulkeutumaan pois liittymästä (kuva 1). Vedenpoistourien jäädessä avonaisiksi on sisäilman mahdollista kulkeutua liittymän sisällä sijaitsevaan ilmatilaan (kuva 1), jolloin sisäilman sisältämä kosteus voi nostaa liittymän suhteellista kosteutta (RH) ja pahimmassa tapauksessa kondensoitua CLT:n pinnalle. Elementtien saumojen ollessa tiivistetty teippaamalla rakenteen ulkoilman puoleisella pinnalla sekä ylemmän sisätilan saumassa, on epätodennäköistä, että liittymässä virtaa merkittävästi ilmaa. Näin ollen voidaan laskentatarkastelussa olettaa, ettei liittymän sisäinen ilmatila lämpene konvektion seurauksena. Tutkimuskohteessa vedenpoistourat tiivistettiin sisävalmistusvaiheessa teippaamalla [3]. Tämän tarkastelun tavoitteena onkin selvittää laskennallisesti, kuinka suuri lämmönvastus vaaditaan tarkasteltavan pinnan kylmälle puolelle ja minkälaisella tuulensuojalevytuotteella tämä saavutetaan, jotta epäilmatiiviin höyrinsulkukerroksen aiheuttama kondenssin ja homeen kasvun riski liittymän sisällä häviää.



Kuva 1. Tutkittava liittymä, rakenteet, liittymän vedenpoistourat ja tarkastelupiste, jossa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvun mahdollisuutta tarkastellaan. Ulkovuorilaudoitusta ja tuuletusvälin detaliikkaa ei ole esitetty kuvassa.

2. Liittymän sisäisen kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun laskennallinen tarkastelu

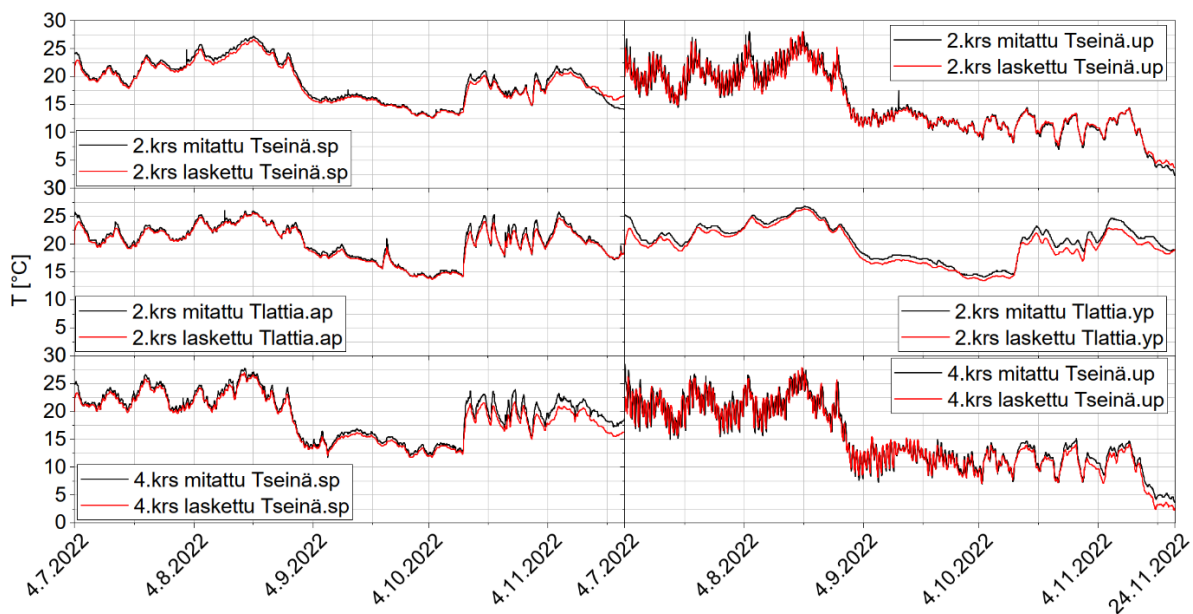
Laskentatarkastelu aloitettiin numeerisella aikariippuvalla laskennalla, jossa ratkaistiin lämpöjakauma tunneittain liittymän kaksikulotteisessa laskentageometriassa Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Rakenteessa lämmönsiirtymistä käsiteltiin lämmön johtumisena. Lämmön siirtyminen konvektiolla ja säteilyllä huomioitiin mallin reunoilla molemmat ilmiöt huomioivilla lämmönsiirtokertoimilla. Laskentamalli ja sen reunaehdot validoitiin diplomityön tapauksissa tehtyjen pitkäaikaisten mittausten perusteella.

Laskettaessa lämmönsiirtymistä laskennan syötteinä käytettiin materiaaliominaisuuksien osalta tiheyttä, lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia. Koska puun lämmönjohtavuus riippuu voimakkaasti puun kosteuspitoisuudesta, CLT-elementtien lämmönjohtavuus määritettiin ratkaisemalla yhdeksän vuoden pituinen lämmön- ja kosteudensiirtymisen aikariippuva laskenta. Laskennan aikana kosteuspitoisuuden muutokset rakenteissa tasaantuivat. Lämmönjohtavuuden arvot valittiin vastaamaan laskennalla saavutettuja kosteuspitoisuuden arvoja, jolloin CLT-lamellikerrosten lämmönjohtavuus vaihteli välillä 0,133 ja 0,120 W/(mK). Liitoksen sisäisen ilmatilan lämmönjohtavuudeksi valittiin arvo 0,024 W/(mK) [4].

Laskennan tarkoituksena oli tarkastella tuulensuojalevyn lämmöneristävyuden vaikutusta liitoksen sisäpuolisen tiivistyksen tarpeeseen, minkä seurauksena tuulensuojalevy mallinnettiin tuulensuojakipsilevynä (9,5 mm) ja mineraalivillapohjaisena tuulensuojalevynä paksuuksilla 30, 40, 50, 60 ja 70 mm. Tuulensuojakipsilevyn lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 0,21 W/(mK) ja lämpöä eristävän tuulensuojalevyn tapauksessa arvoa 0,033 W/(mK), joka vastaa Paroc Cortex-tuulensuojalevyn lämmönjohtavuutta.

Laskentamallin sisäilman reunaehtona käytettiin lämpötilaa 21°C [1]. Ulkoilmareunaehtoa varten muodostettiin paikallinen säätiedosto Kumpulassa sijaitsevan Ilmatieteenlaitoksen havaintoaseman mittausten perusteella [5]. Laskentavuodeksi valittiin vuosi 2020. Ulkoverhous jätettiin laskentamallista pois, jolloin mallinnusgeometria päätettiin tuulensuojalevyn ulkopintaan. Ulkoverhouksen ja tuuletusvälin vaikutus huomioitiin ulkoilman reunaehdossa ratkaisemalla tuuletusvälissä vaikuttava lämpötila ajasta riippumattomin menetelmin valitun laskentavuoden lämpötilan arvoista ja käyttämällä tätä reunaehtona. Tuuletusvälin lämpötila ja mallin ulkopinnalla vaikuttavat lämmönsiirtokertoimet ratkaistiin rakenneosien lämmönvastuksien ja tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden perusteella. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuksiksi valittiin arvot 5 1/h ja 300 1/h, joista arvolla 5 1/h laskettu tuuletusvälin lämpötila vastasi mittauksia riittävällä tarkkuudella [3].

Simuloitua lämpötilaa verrattiin mitattuun lämpötilaan kuudessa kohtaa rakenneliittymää, joista kaksi sijaitsi välipohjan CLT-elementissä ylimmässä ja alimmassa puulamellissa 30 mm syvyydessä. Neljästä jäljelle jäävästä vertailupisteestä kaksi sijaitsi ulkoseinän CLT-elementin ulkoilman puoleisimmassa lamellissa ja kaksi sisätilan puoleisimmassa lamellissa 30 mm syvyydessä. Verrattaessa rakenteesta mitattua ja simuloitua lämpötilaa keskenään huomataan, että poikkeama niiden välillä pysyttelee pääasiassa 1,5 °C sisäpuolella (kuva 2). Laskentamallin ja reunaehtoien määrittäminen, perustelut parametrivalinnoille sekä validointi on esitetty tarkemmin lähteessä [3].



Kuva 2. Simuloitu ja mitattu rakenteen lämpötila kuudessa tarkastelupisteessä [3].

2.1 Kosteuden kondensoituminen

Kondenssin mahdollisuutta kuvassa yksi esitettyyn tarkastelupisteeseen arvioitiin ratkaisemalla vesihöyryn kyllästyspitoisuus liittymän sisällä sijaitsevassa tarkastelupisteessä kaavalla 1 käyttäen lämpötilana numeerisella laskennalla ratkaistua lämpötilaa [6]. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä ratkaistiin jakamalla sisäilman vesihöyryn pitoisuus vesihöyryn kyllästyspitoisuudella. Laskenta suoritettiin vuoden mittaisena ja tunnin aika-askeleella, jolloin saatiin käsitys kondensoitumistapahtumien taajuudesta. Sisäilman vesihöyrypitoisuus määritettiin lisäämällä ulkoilman vesihöyrypitoisuuden tilojen käytöstä seuraava sisäilman kosteuslisä.

$$v = 4,85 + 3,47 \cdot \left(\frac{T}{10}\right) + 0,945 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^2 + 0,158 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^3 + 0,028 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^4 \quad (1)$$

missä v = ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuus (g/m³)
 T = lämpötila (°C)

2.2 Homeen kasvu

Homemallitarkastelussa tarkasteltiin homeen kasvun mahdollisuutta liittymän sisällä CLT:n pinnalla kuvan yksi tarkastelupisteessä. Viiden vuoden pituinen tarkastelu tehtiin Suomalaisella homemallilla käyttäen suhteellisen kosteuden arvoina edellisessä osiossa laskettuja arvoja ja numeerisella lämpölaskennalla saatua tarkastelupisteen lämpötilaa. Tarkasteltavan pinnan homehtumisherkkyysluokkana käytettiin luokkaa HHL2, joka vastaa höylättyä puuta [7]. Tällöin kriittisen suhteellisen kosteuden raja noudattaa kaavaa 2 [8].

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 T^3 + 0,16 T^2 - 3,13 T + 100 & \text{kun } T \leq 20 \\ 80 \% & \text{kun } T > 20 \end{cases} \quad (2)$$

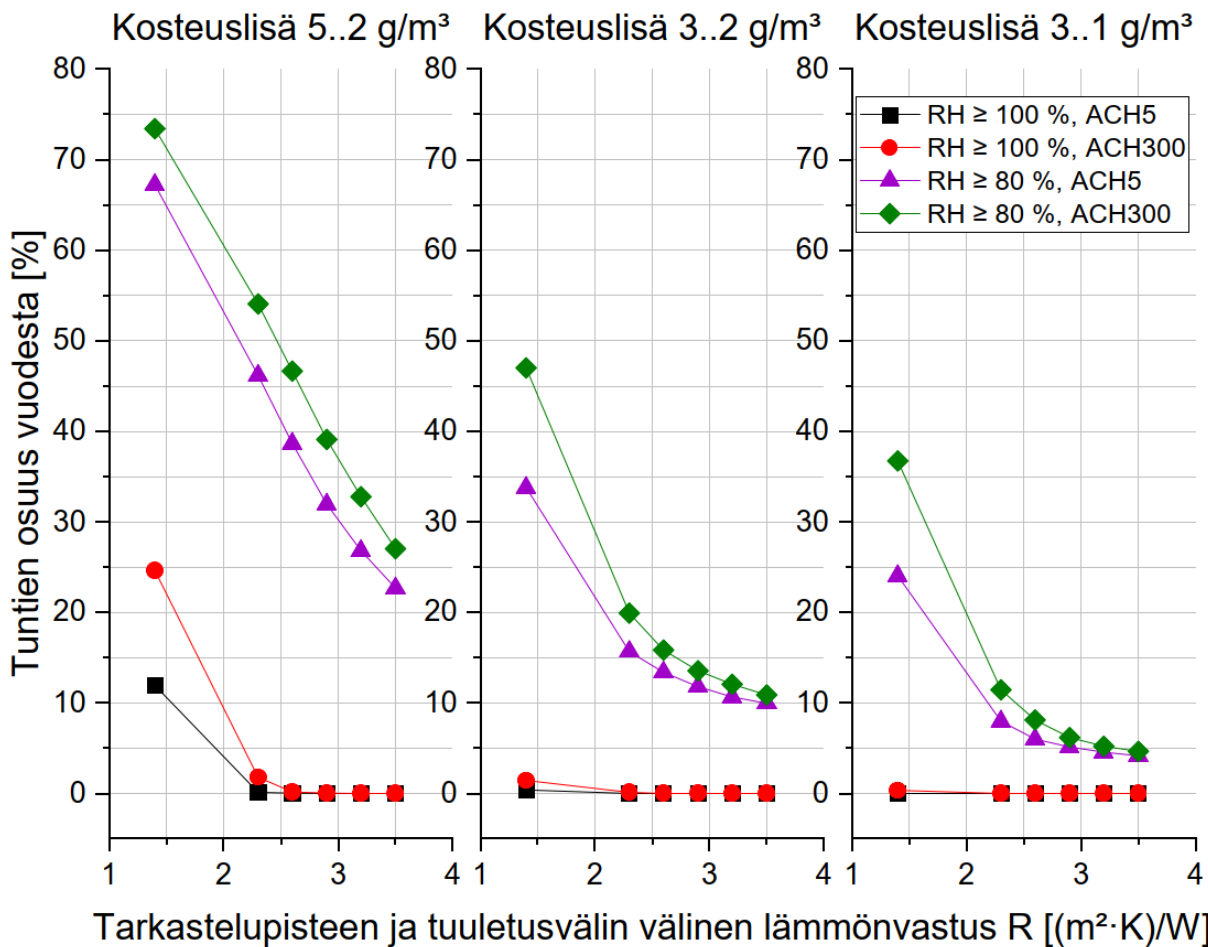
missä RH_{crit} = kriittisen suhteellisen kosteuden raja (%)
 T = lämpötila (°C)

3. Tulokset

3.1 Kosteuden kondensoituminen ja suhteellinen kosteus liittymässä

Kuvassa kolme on esitettyä prosenttiosuus vuoden tunneista, jolloin suhteellinen kosteus liittymässä ylittää 80 % ja 100 %. Kuvaajat on esitetty tarkasteltavan pinnan ja tuuletusvälin välisen lämmönvastuksen funktiona. Pintavastuksia ei lämmönvastuksessa huomioitu, jolloin lämmönvastus muodostuu 150 mm paksusta puuosasta ja tuulensuojalevystä. Puuosan lämmönvastuksena käytettiin arvoa 1,36 (m²K)/W. Kuvaajat eroavat toisistaan sisäilman kosteuslisän, tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden ja suhteellisen kosteuden osalta. Kuvaajien ensimmäinen piste kuvaa tilannetta, jossa ulkoseinän pinnalla on tuulensuojakipsilevy. Seuraavassa pisteessä tuulensuojana on 30 mm paksu mineraalivillapohjainen tuulensuojalevy. Tästä eteenpäin tuulensuojalevyn paksuus kasvaa pisteiden välillä 10 mm aina 70 mm saakka.

Kuvan kolme kuvaajista nähdään, että sisäilman kosteuslisällä ja tuulensuojalevyn lämmöneristävyydellä on suuri vaikutus liitoksen sisäiseen suhteelliseen kosteuteen. Mikäli liittymän sisäpinnan (kuva 1) ja tuuletusvälin välinen lämmönvastus on enemmän kuin 2,3 (m²K)/W, joka tässä tapauksessa saavutettiin 150 mm paksulla puuosalla ja 30 mm paksulla mineraalivillapohjaisella tuulensuojalevyllä, häviää kondenssin riski liittymän sisällä lähes kokonaan kaikilla laskennassa käytetyillä kosteuslisän arvoilla. Hetket, joilla liitoksen suhteellinen kosteus ylittää 80 % eivät häviä kokonaan yhdessäkään laskentatapauksessa. Tapahtumat kuitenkin vähenevät huomattavasti, jos tuulensuojalla on lämmöneristyskykyä. Vaikka hetkiä, jolloin liitoksen sisällä CLT:n pinnalla suhteellinen kosteus ylittää arvon 80 % esiintyy, on liitoksen lämpötila näillä hetkillä pääasiassa matalampi kuin 20 °C, jolloin myös homeen kasvun edellyttämä RH-taso on yli 80 %.

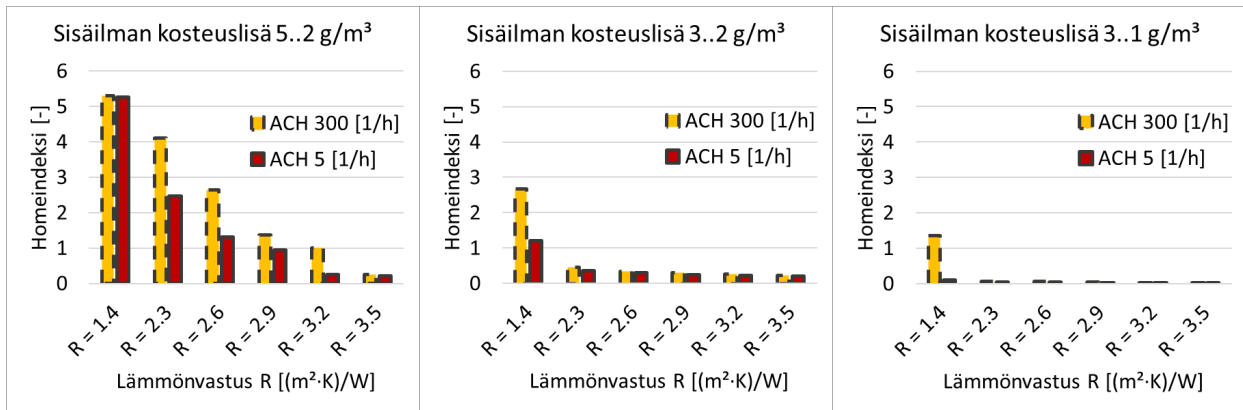


Kuva 3. Kosteuden kondensoitumisen ja 80 % RH:n ylittävien hetkien prosenttiosuus vuodesta tarkasteltavan pinnan ja tuuletusvälin välisen lämmönvastuksen funktiona. Kuvaajat eroavat toisistaan kosteuslisän arvojen ja tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden (ACH [1/h]) osalta.

3.2 Homeen kasvu

Kuvassa neljä on esitetty homeindeksi tarkastelupisteessä (kuva 1) tarkasteltavan pinnan ja tuuletusvälin välisen lämmönvastuksen funktiona kolmella eri sisäilman kosteuslisän arvolla. Esitetty homeindeksin arvo on viiden vuoden pituisen simuloinnin viimeisenä vuotena saavutettu homeindeksin korkein arvo. Homemallinnuksessa käytettiin numeerisella laskennalla saatuja tarkastelupisteen lämpötiloja, sekä kosteudenkondensoitumislaskennalla saatuja suhteellisen kosteuden arvoja. Kahdessatoista kolmestakymmenestäkuudesta simuloinnista ylitettiin homeindeksin arvo yksi viimeisen kalenterivuoden aikana.

Runsaalla sisätilojen kosteustuotolla (kosteuslisä 5...2 g/m³) homeindeksi pysyy arvon yksi alapuolella, kun lämmönvastus tuuletusvälin ja tarkasteltavan pinnan välillä on enemmän kuin 3,2 (m²K)/W, joka saavutettiin tässä 60 mm paksulla mineraalivillapohjaisella tuulensuojalevyllä. Sisäilman kosteuslisän arvoa 3...2 g/m³ suositellaan käytettävän palvelurakennusten rakenteiden kosteusteknistä toimintaa arvioitaessa [2]. Kyseisellä arvolla homeindeksi ei saavuta arvoa yksi, kun lämmönvastus on enemmän kuin 2,3 (m²K)/W, joka saavutettiin 30 mm paksulla mineraalivillapohjaisella tuulensuojalevyllä. Vähäisellä sisätilojen kosteustuotolla (kosteuslisä 3...1 g/m³) saavutetaan homeindeksin arvo yksi vain matalimmalla laskennassa käytetyllä lämmönvastuksella (1,4 (m²K)/W) ja korkeammalla tuuletusvälin ilmanvaihtuvuudella (ACH 300 1/h).



Kuva 4. Homeindeksi tarkasteltavan pinnan ja tuuletusvälin välisen lämmönvastuksen funktiona kolmella eri sisäilman kosteuslisän ja kahdella tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden arvolla (ACH).

4. Yhteenveto

Tässä artikkelissa tarkasteltiin tuulensuojalevyn lämmöneristävyyden ja höyrynsulkukerroksen tiiviyden vaikutusta CLT-runkoisen ulkoseinän ja välipohjan liittymän kosteustekniseen toimivuuteen. Tulosten perusteella massiivipuulevyrunkoisessa ulkoseinässä lämmöneristyskykyä omaavalla tuulensuojalevyllä saadaan vähintäänkin parannettua ulkoseinäliittymien vikasietoisuutta. Liittymässä tarkasteltavan pinnan ja tuuletusvälin välisen lämmönvastuksen ollessa enemmän kuin 2,3 (m²K)/W, joka saavutetaan 150 mm paksulla puuosalla ja 30 mm paksulla mineraalivillapohjaista tuulensuojalevyllä, ei homeenkasvua esiinny sisäilman kosteuslisän ollessa enintään 3..2 g/m³. Tässä tapauksessa myös epäilmatiiivistä höyrynsulkukerroksesta seuraava kosteuden kondensoitumisen riski liittymässä häviää lähes kokonaan kaikilla laskennassa käytetyillä sisäilman kosteuslisän arvoilla. Toisin sanoen on suositeltavaa käyttää vähintään 30 mm paksua lämpöä eristävää tuulensuojalevyä tuulensuojakipsilevyn sijaan. Näin saadaan varmuutta liittymän kosteustekniseen toimintaan. Vaikka liittymä tiivistettäisiin sisätilojen puolelta, on sillä vikasietoisuutta ja paremmat toimivuuden edellytykset tässä tapauksessa. Lisäksi lämpöä eristävällä tuulensuojalevyllä on rakennuksen energiatehokkuutta parantava vaikutus.

Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J. (toim.) 2014. RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki, 500 s.
- [2] Laukkarinen, A., Kauppinen, A., Tuominen, E., Raunima, T., ja Vinha, J. (2019). Koulujen ja päiväkotien sisäilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden mittaukset COMBI-hankkeessa. Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Vol. 6, s. 133–138.
- [3] Tammi, S. 2023. Rakennusvaiheen vaikutus kerrostalon massiivipuulevyliitosten rakennusfysikaaliseen toimivuuteen. Diplomityö Aalto-yliopisto, Otaniemi, 90 s.
- [4] Seppälä, A., ja Lampinen, M. J. 2020. Aineensiirto-oppi. Otatiето 604, Helsinki, 219 s.
- [5] Ilmatieteenlaitos, verkkosivut. Luettu 13.5.2023
- [6] Rafnet. 2020. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille - Kosteus. Terveet tilat 2028-ohjelma, Ympäristöministeriö, 84 s.
- [7] Suomalainen homemalli. Verkkosivut. Tampereen yliopisto. Luettu 13.2.2023.
- [8] Hukka, A., ja Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology, Vol. 33, s. 475–485.

Julkisivutuotteiden suoritustason määrittäminen vaativiin kohteisiin

Andreas Linnell
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Julkisivutuotteiden suoritustasojen luokitukset on yhtenäistetty CE-merkinnän käyttöönoton myötä. Rakennustieto on myös julkaissut ohjeen, jossa on annettu vähimmäisvaatimuksia eri ominaisuuksille erityyppisissä projekteissa. Tämä ohje on hyvä lähtökohta ja auttaa suunnittelijaa ymmärtämään hankalasti tulkittavia luokituksia. Vaativissa kohteissa on kuitenkin tarkasteltava kohteessa vallitsevat olosuhteet erikseen ja tarvittaessa määrittellä tiukempia vaatimuksia. Julkisivutuotteiden ja niiden laadunhallinnan kannalta voi olla järkevää teettää projektikohtaiset testit, sillä valmistaja saattaa nojata järjestelmäkehittäjän testeihin, eikä välttämättä ole sisäistänyt kaikkia järjestelmän yksityiskohtia, mikä voi johtaa poikkeamiin.

1. Johdanto

Rakennustuotteille vaaditaan nykyään CE-merkintä, mikäli tuote kuuluu harmonisoidun tuotestandardin piiriin. Lisäksi valmistaja voi vapaaehtoisesti hakea rakennustuotteelleen eurooppalaisen teknisen arvioinnin (eng. ETA). Kun ETA hakemus on hyväksytty, on valmistajan CE-merkittävä tuotteensa [1]. ETA hakemus perustuu aina olemassa olevaan eurooppalaiseen arviointidokumenttiin (eng. EAD). Harmonisoitu tuotestandardi tai EAD määrittelevät mitkä ominaisuudet tietylle rakennustuotteelle voi ja tulee määrittellä [2].

CE-merkki ei vielä takaa sitä, että tuote soveltuu suunniteltuun kohteeseen, vaan rakennushankkeesta vastaavan tulisi varmistaa, että tuotteen ilmoitetut suoritustasot täyttävät kohteeseen asetetut vaatimukset. Osa suoritustasovaatimuksista on hyvin suunnittelijan tiedossa, mutta toiset saattavat olla hieman vaikeampia määrittää. Rakennustiedon kokoama ryhmä on tätä varten valmistellut rakennustuotteille taulukon, josta voi katsoa tietyille rakennustuotteille perusominaisuudet sekä kohteeseen sopivan vaatimustason [3].

Tässä artikkelissa keskitytään pääasiassa kevyiden julkisivujärjestelmien suoritustasoihin ja erityisesti vaativien kohteiden suoritustasovaatimuksiin. Projektikohtaiset testit voivat edesauttaa laadunvarmistusta ja säästää mittavista korjaustoimenpiteistä työmaalla.

2. Kevyet julkisivutuotteet ja -järjestelmät

Julkisivutuotteet, joihin tässä keskitytään, ovat pääasiassa kevyet julkisivujärjestelmät sekä ikkunat ja ovet. Niiden ominaisuudet määrittellään vastaavalla tavalla, vaikka suoritustasojen luokitukset yleensä ilmoitetaan eri tavalla. Taulukossa 1 on listattu näiden tuotestandardit.

2.1 Ovet ja ikkunat

Rakennuksen julkisivuun sijoitetaan lähes poikkeuksetta aukkoja, joihin tulee avattavia ovia ja ikkunoita, joiden läpi saadaan valoa. Harmonisoidut tuotestandardit erottelevat ikkunat esimerkiksi julkisivujärjestelmään asennettavasta täytepaneelista, kuten eristyslaseista, mitkä ovat myös eräänlaisia ikkunoita, mutta ne eivät kuulu saman tuotestandardin piiriin.

2.2 Julkisivujärjestelmät

Julkisivujärjestelmien määrittäminen on melko laaja, mutta se käsittää järjestelmät, jotka koostuvat rakenteellisista pysty- ja vaakaprofiileista, jotka kytketään yhteen ja tuetaan rakennuksen runkoon. Rungon välissä on itsekantavia täytepaneeleja, jotka muodostavat rakennuksen ulkovaipan. Täytepaneelit voivat olla eristyslaseja, levyjä tai jotain muuta materiaalia, mikä muodostaa tiiviin rakenteen [4].

3. CE-merkintä

CE-merkintä varmistaa, että tuotteiden ominaisuudet ilmoitetaan suoritustasoilmoituksella aina samalla tavalla, joka on määritetty harmonisoidussa tuotestandardissa tai EAD:ssa. CE-merkinnän käytön edellytyksenä on, että kyseiselle tuotteelle on julkaistu harmonisoitu tuotestandardi, jonka siirtymäaika on alkanut, tai tuotteelle on myönnetty eurooppalainen tekninen arviointi ETA. ETA hakemus perustuu aina olemassa olevaan eurooppalaiseen arviointi dokumenttiin. Suomi on lisäksi katsonut, että jotkut harmonisoidut tuotestandardit eivät ole tarpeeksi kattavia tietyiltä osin, minkä takia on luotu täydentäviä kansallisia soveltamisstandardeja. Tässä artikkelissa keskitytään taulukossa 1 listattuihin tuotteisiin ja niiden suoritustaso-vaatimuksiin.

Taulukko 1. Julkisivutuotteiden tuotestandardit sekä kansalliset soveltamisstandardit [3].

Tuotestandardin nimi	Numero	Julkaistu (OJ) versio
Julkisivujärjestelmät	EN 13830	2003
Ikkunat ja ovet	EN 14351-1 ja SFS 7031	2006
Eristyslasit	EN 1279-5	2018

3.1 Harmonisoidut tuotestandardit

Harmonisoidussa tuotestandardissa määritellään, mitkä ominaisuudet tai suoritustasot ovat tuotteella oleellisia ja millä tavalla ne tulisi määrittää. Osa suoritustasoista voidaan määrittää laskennallisesti ja jotkut suoritustasot, kuten esimerkiksi ilman- ja sateenpitävyydet sekä tuulenpaineenkestävyyden suoritustasot, testataan erillisen testausstandardin mukaan. On kuitenkin huomioitavaa, että joistain harmonisoidusta tuotestandardista löytyy myös päivitettyjä versioita, mutta niitä ei sovelleta CE-merkintään ennen kuin ovat julkaistu EU:n virallisissa lehdessä (OJ) [3].

3.2 Kansalliset soveltamisstandardit

Yhteiseurooppalaisia tuotestandardeja täydentävät kansalliset soveltamisstandardit on luotu tarkentamaan Suomen kansallisia vaatimuksia. Niissä voi mm. olla määritetty, mitkä kaikki suoritustasot pitää ilmoittaa tai mikä ovat vaatimustasot eri käyttökohteisiin.

3.3 EAD

Tuotteelle on myös mahdollista hakea CE-merkkiä, vaikka se poikkeaa harmonisoidun tuotestandardin tuotemäärittelystä, jos tuotetyypille löytyy EAD. Silloin tuote CE-merkittään ETA-hyväksynnän perusteella, joka perustuu kyseisen tuotetyypin EAD:hen. EAD:ssä käytetyt suoritustason määrittäykset perustuvat monesti harmonisoitujen tuotestandardien tavoin EN

testaus- ja luokitusstandardeihin ja saattavat muistuttaa harmonisoitua tuotestandardia, mutta niissä on myös määritelty miten tuotetyypille ominaisia suoritustasoja, jotka eivät löydy tuotestandardeissa, tulisi määritellä ja luokitella [2]. Julkisivutuotteet, joille löytyy EAD, ovat mm. lasin rakenteellinen liimaus tai kantavat puuelementit.

3.4 Julkisivutuotteiden vaatimustasot

Julkisivutuotteiden suoritustasojen luokitukset on yhtenäistetty CE-merkinnän käyttöönoton myötä, jotta niiden vertaileminen olisi helpompaa. Julkisivutuotteiden suoritustasot eivät kuitenkaan välttämättä kerro suoraan mihin tuote ominaisuuksien puolesta sopii. Yleensä korkeampi luokka tarkoittaa parempaa suoritustasoa, mutta joissakin tapauksissa luokitukselta voi olla vaikea ymmärtää, mitä se tarkoittaa, ilman syvällistä perehtymistä standardeihin tai ohjetta, joka avaa luokitusten taustat.

Rakennuksen rakennuspaikka, käyttötarkoitus ja rakennuksen muoto vaikuttaa rakennustuotteisiin kohdistuviin rasituksiin, joka taas heijastuu vaatimustasoon. Tuotteen suoritustason nostaminen saattaa taas nostaa tuotantokustannuksia, joten oikean vaatimustason asettaminen on rakennushankkeesta vastaavan intressissä. Rakennustieto on julkaissut internetsivuillaan tätä varten ohjeen, jossa eri rakennustuotteille löytyy taulukkomuodossa listattuna perusominaisuudet ja vaatimustasot erityyppisille kohteille ja rasituksille [3].

Suunnittelijan on hyvä tietää, milloin vaaditaan mitäkin, mutta eteen voi myös tulla vaativia tai poikkeuksellisen vaativia kohteita, jolloin hänen on myös itse käytettävä harkintaa ja ymmärrettävä, mitkä ovat kohteessa vallitsevat olosuhteet ja rasitukset. Sen perusteella suunnittelijan tulee itse määritellä sopiva vaatimustaso.

Mikäli kohteelle on teetetty tuulitunnelikoe, kyse on todennäköisesti korkeasta ja poikkeuksellisen vaativasta kohteesta. Tuulitunnelikokeesta nähdään tarkemmin, millaiselle tuulenpaineelle ulkovaippa altistuu. Tyypillisesti tällaisissa kohteissa puhutaan yli 2 kN/m^2 tuulenpaineista. Rakenteelliset tuulikuormat annetaan puuskanopeuspaineena, eli noin 3 sekunnin huippupaineita ja mitoitusarvot perustuvat yleensä kerran 50 vuodessa esiintyviin myrskyn tuulennopeuksiin. Tavanomaiset sateenpitävyysluokat ovat vain 600 Pa asti, jonka jälkeen tulee erikoisluokat, jonka perään ilmaistaan paine. Kohteessa, jossa puuskanopeuspaine nousee yli 2000 Pascalin, tällainen sateenpitävyystaso ei ole riittävä. Vertailemalla erilaisia tuotteita saa myös paremman käsityksen, mihin sateenpitävyystasoon on mahdollista päästä. Julkisivutuote, jonka sateenpitävyys on 1200 Pa asti ei tänä päivänä ole mikään kovin harvinainen tuote, mutta sen suuremmat vesitiiveystasot ovat harvinaisempia. Seuraavassa kappaleessa on avattu tarkemmin mitä tämä sateenpitävyystaso tarkoittaa ja miten sitä mitataan.

Korkeissa kohteissa on myös muistettava, että hormivaikutuksen takia rakennuksen ylä- ja alakerroksien ulkovaipan yli muodostuu aina suurempia paine-eroja, kuin matalassa rakennuksessa, jolla on vastaava ilmatiiveys. Mitä ilmatiiviimpi vaippa on, sitä pienempiä paine-eroja syntyy vaipan yli. Korkeassa rakennuksessa on sateen aikana merkittävä paine-ero vaipan yli valmiiksi, vaikka ei olisi tuulta. Myös pinta-ala, johon viistosade osuu, on suurempi ja suurin osa sateesta valuu alas julkisivua pitkin. Ilmatiiveyden painoarvoa korostuu siis kahdesta syystä, korkeammasta tuulenpaineesta ja hormivaikutuksesta, mitä korkeammasta rakennuksesta on kyse [5].

4. Suoritustason määrittäminen testaamalla

Julkisivutuotteen eräiden suoritustasojen määrittelyyn tarvitaan ulkopuolinen akreditoitu laitos, joka suorittaa testit testausstandardien mukaan. Kyseisen tuotteen testaus- ja luokitusstandardit ovat määritelty tuotteen harmonisoidussa tuotestandardissa tai EAD:ssa.

Tässä artikkelissa keskitytään julkisivuille erityisen tärkeisiin vesi- ja ilmatiiveyteen sekä tuulenpainekestävyyteen. Julkisivujärjestelmien, ikkunoiden ja ovien testausmenetelmät suoritetaan vastaavalla tavalla, mutta suoritustasot määritellään ja luokitellaan hieman eri tavalla.

Kyseiset ominaisuudet testataan kaikki samalla kerralla tietyssä järjestyksessä (1–6). Mikäli tuotteelle määritellään iskunkestävyys, se suoritetaan vasta näiden vaiheiden jälkeen. Kyseinen tuote asennetaan tiiviisti painekammion ja normaalin paineen omaavan tilan väliin. Paine-eroa vaipan yli luodaan vaiheittain testausstandardin määrittelemällä tavalla. Paineen nostamista edeltää aina kolme 500 Pa yli 3 sekuntia kestävä sykäystä.

1. Ilmanpitävyys
2. Sateenpitävyys
3. Tuulenpaineenkestävyys (karakteristinen tuulikuorma)
4. Ilmanpitävyys, toistetaan
5. Sateenpitävyys, toistetaan
6. Tuulenpaineenkestävyys, turvallisuus (1,5 varmuuskertoimella)
7. (Iskunkestävyys, tarvittaessa)

Julkisivujärjestelmien ilmanpitävyys testataan EN 12153 [6] mukaan ja luokitellaan EN 12152 [7] mukaan. Ikkunat ja ovet testataan EN 1026 [8] mukaan ja luokitellaan EN 12207 [9] mukaan. Testattavan tuotteen pinta-alaan tai sauman juoksumetriin nähden on annettu maksimi määrä ilmavuotoa tunnissa tietyn paine-eron aikana.

Julkisivujärjestelmien sateenpitävyys testataan EN 12155 [10] mukaan ja luokitellaan EN 12154 [11] mukaan. Ikkunat ja ovet testataan EN 1027 [12] mukaan ja luokitellaan EN 12208 [13] mukaan. Testattavan järjestelmän ulkopuolelle asetetaan sadettaja, joka suihkuttaa 2 l/min/m². Sadettajaa laitetaan päälle sykäysten jälkeen ja sen tulee olla päällä 15 minuuttia ilman paine-eroa. Rakenteen yli luodaan paine-ero, niin että ulkopuolella aina suurempi paine. Paine-ero nostetaan aluksi 50 Pa kerrallaan 200 Pa asti, sitten 300 Pascaliin, jonka jälkeen paine nousee 150 Pa kerralla. Mikäli testattavan rakenteen läpi tulee vesipisara tietyn paineen vallitessa, luokitellaan tuote edellisen paineluokituksen mukaan.

Julkisivujärjestelmien tuulenpaineenkestävyys testataan EN 12179 [14] mukaan ja luokitellaan EN 13116 [15] mukaan. Ikkunat ja ovet testataan EN 12211 [16] mukaan ja luokitellaan EN 12210 [17] mukaan. Testin aikana mitataan siirtymät, jotka eivät saa ylittää EN 13830:2003 mukaisia taipumarajoja ja rakenteen tulisi palautua vähintään 95 % tunnin sisällä. Sykäysten jälkeen paine nostetaan 25 % kerrallaan, kunnes mitoittava tuulenpaine on saavutettu. Ensin testataan positiivinen paine (tuulenpaine), sen jälkeen negatiivinen paine (imu). Lopuksi nostetaan paine vielä 1,5 kertaiseksi.

Taulukossa 2 on esitetty julkisivujärjestelmille standardit, luokitukset ja vähimmäisvaatimukset sekä taulukossa 3 ikkunoiden ja ovien standardit, luokitukset ja vähimmäisvaatimukset. Vähimmäisvaatimus koskee pientaloja ja vaativimmissa kohteissa vaatimustasot ovat usein korkeampia [3].

Taulukko 2. Julkisivujärjestelmien standardit, luokitukset ja vähimmäisvaatimukset [3].

Ominaisuus	Testaus- ja luokitusstandardi	Luokitus	Vähimmäisvaatimus	Paine [Pa]
Ilmanpitävyys	EN 12152, EN 12153	A1-A4, AE	A3 (450 Pa)	150–600, > 600
Vedenpitävyys	EN 12154, EN 12155	R4-R7, RExxx	R6 (450 Pa)	150–600, xxx
Tuulenpaineen kestävyys	EN 12179, EN 13116	+ xxx - yyy	Käyttörajan tuulenpaine	+ xxx - yyy

Taulukko 3. Ikkunoiden ja ovien standardit, luokitukset ja vähimmäisvaatimukset [3].

Ominaisuus	Testaus- ja luokitusstandardi	Luokitus	Vähimmäisvaatimus	Paine [Pa]
Ilmanpitävyys	EN 1026, EN 12207	1–4	4 (600 Pa)	150–600
Vedenpitävyys	EN 1027, EN 12208	1A-9A, Exxx tai 1B-7B	8A (450 Pa)	50–600, xxx tai 50–300
Tuulenpaineen kestävyys	EN 12211, EN 12210	C1-C5, Exxxx	C3 (1200 Pa)	400–2000, xxx

4.1 ITT-testausraportti

Akreditoitu testauslaitos kirjoittaa aina testistä ja sen tuloksista ITT-testausraportin, jossa on esitetty tuotteen koko, rakenne, liitosdetaljit ja mittapisteet sekä muuta oleellista. Tätä raporttia voidaan hyödyntää vastaavanlaiselle rakenteelle niin kauan, kun rakenteeseen ei tehdä muutoksia, jotka voivat vaikuttaa tuloksiin. EN 13830:2015 + A1:2020:n liitteessä F löytyy nykyään ohje, josta voi tarkistaa, mitkä muutokset voivat vaikuttaa tuotteen suoritustasoon. [4]

Järjestelmäkehittäjät pyrkivät kuitenkin luokittelemaan järjestelmiään niin, että kerran tehtyjä testituloksia pystytään hyödyntämään jatkossakin. Järjestelmäkehittäjä saattaa lisensoida tuotteensa usealle valmistajalle, jotka perehdytetään järjestelmään ja sen yksityiskohtiin. Näin vältetään tilanne, jossa joka kohde pitää testata erikseen.

4.2 Projektikohtainen testaus

Eräissä projekteissa on perusteltua teettää projektikohtainen testi, eteenkin jos kyse on korkeasta rakennuksesta, joka saattaa koostua yli tuhannesta vastaavanlaisesta elementistä. Silloin saadaan testattua kyseisen geometrian omaavat tuotteet valitulta valmistajalta.

Vaikka valmistaja olisi tehnyt vastaavalla järjestelmällä aikaisempia kohteita, järjestelmään saattaa liittyä yksityiskohtaisia ohjeita, mitkä voivat olla hankalia tulkita oikein. Silloin piilee riski, että tuotteeseen jää jokin pieni poikkeama tai virhe, jonka vaikutus suoritustasoon voi olla merkittävä. Teettämällä projektikohtaisen testin, tällaiset poikkeamat ja virheet löydetään jo ennen tuotannon käynnistämistä. Ne saadaan korjattu edullisemmin kuin kesken tuotannon tai pahimmassa tapauksessa asennuksen jälkeen rakennuksen ulkopuolelta monien kymmenien metrien korkeudessa.

4.3 Potentiaaliset vuotokohdat

Kokemuksen perusteella mahdolliset virheet, jotka saattavat johtaa vuotoihin liittyvät usein puutteelliseen vedenpoistoon, vääränlaiseen tiivisteseen, sen asentamiseen, liian suuriin toleransseihin tai asennusohjeen tulkintavirheeseen. On myös mahdollista, että julkisivujärjestelmään on asennettu avattava ikkuna, jonka liitosta julkisivujärjestelmään ei ole

koskaan testattu. Valmistaja on mahdollisesti joutunut itse ratkaisemaan liitoksen, eikä se välttämättä vastaa muuta järjestelmää. Julkisivujärjestelmä ja sen sisältämät erilliset tuotteet tulisi aina testata yhdessä.

5. Yhteenveto ja johtopäätökset

Julkisivutuotteiden suoritustasojen luokitukset on yhtenäistetty CE-merkinnän käyttöönoton myötä. Rakennustieto on myös julkaissut ohjeen, joka auttaa suunnittelijaa määrittelemään kohteisiin sopivat suoritustasovaatimukset, ottaen huomioon rakennuksen ominaispiirteet.

Poikkeuksellisen vaativissa kohteissa, kuten korkeissa rakennuksissa lähellä merta, on syytä tarkastella vaatimustasoja tarkemmin vallitseviin olosuhteisiin nähden. Suoritustasovaatimusten on kuitenkin oltava sellaiset, johon on mahdollista nykyratkaisuilla päästä. Ilmanpitävyydellä on myös suurempi merkitys mitä korkeampi rakennus on, sillä hormivaikutuksen takia paine-ero vaipan yli kasvaa ja sateella se tarkoittaa, että testattu paine-ero tulee nopeammin vastaan.

Laadunhallinnan kannalta voi olla järkevää teettää projektikohtaisia testejä, sillä se varmistaa, että valmistajan tuotteessa ei ole mitään piilossa olevaa virhettä, joka vaikuttaa heikentävästi suoritustasoon, vaikka olisi olemassa järjestelmätoimittajan ITT-testausraportti, jonka mukaan tuote täyttää vaatimukset. Näin saadaan varmistettua, että julkisivutuote täyttää rakennukselle asetetut laadulliset kriteerit ja suoritustasovaatimukset.

Lähdeluettelo

- [1] hEN Helpdesk. CE-merkintä
<https://henhelpdesk.fi/ce-merkinta/>
- [2] EOTA. What is EAD
<https://www.eota.eu/what-ead>
- [3] Rakennustieto. Suunnittelun tuotemäärittely rakennustuotteille
<https://www.rakennustieto.fi/suunnittelun-tuotemaarittely-rakennustuotteille>
- [4] SFS-EN 13830. Julkisivujärjestelmät. Tuotestandardi. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
- [5] RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- [6] SFS-EN 12153. Curtain walling. Air permeability. Test method. SFS
- [7] SFS-EN 12152. Curtain walling. Air permeability. Performance requirements and classification. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
- [8] SFS-EN 1026. Windows and doors. Air permeability. Test method. SFS
- [9] SFS-EN 12207. Windows and doors. Air permeability. Classification. SFS
- [10] SFS-EN 12155. Curtain walling. Watertightness. Laboratory test under static pressure. SFS
- [11] SFS-EN 12154. Curtain walling. Watertightness. Performance requirements and classification. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
- [12] SFS-EN 1027. Windows and doors. Water tightness. Test method. SFS
- [13] SFS-EN 12208. Windows and doors. Water tightness. Classification. SFS
- [14] SFS-EN 12179. Curtain walling. Resistance to wind load. Test method. SFS
- [15] SFS-EN 13116. Curtain walling. Resistance to wind load. Performance requirements. SFS
- [16] SFS-EN 12211 Windows and doors. Resistance to wind load. Test method. SFS
- [17] SFS-EN 12210 Windows and doors. Resistance to wind load. Classification. SFS

Puu- ja hybridirakenteiden liitosten tiiveys ja kosteuskäyttäytyminen

Anti Rohumaa

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Kuitulaboratorio, Savonlinna

Tiivistelmä

Suuren mittakaavan rakentamisessa sovellettavat massiivipuu- ja hybridirakenteet ovat suhteellisen uusia sekä Suomessa että ulkomailla ja niiden liittymien ja liitoselementtien suunnitteluratkaisut ovat edelleen kehitysvaiheessa. Rakennusosien liittymät ovat kuitenkin ulkovaipan ilma- ja höyrytiiviyden heikoin lenkki, koska ne muodostavat joissakin tapauksissa erittäin monimutkaisia epäjatkuuskohtia ulkovaipan ilman- ja höyrynsulkukerrokseen. Rakennuksen ulkovaipan liittymien heikko ilmatiiviyys aiheuttaa ensisijaisesti kosteusteknisen riskin puurakenteille ulko-olosuhteissa. Teollisesti toteutettavia ja luotettavia tiivistysmenetelmiä analysoimalla ja kehittämällä voidaan merkittävästi parantaa teollisen puurakentamisen kustannuskilpailukykyä ja rakentamisen laatua.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa on käynnissä aihetta koskeva Etelä-Savon maakuntaliiton ja alan yritysten rahoittama tutkimushanke. Hankkeen tavoitteena on tuottaa tietoa kestävästä ja taloudellisista rakenne-, liitos- ja tiivistysratkaisuista. Hankkeessa on suunniteltu ja toteutettu empiiristä kenttätason tutkimusta varten kaksikerroksinen testitalo, jossa kosteusanturien ja lämpökameratekniikan avulla tutkitaan rakenteita ja liitoksia todellisilla toleransseilla. Testitalo on varustettu 200 anturilla ja automaattisilla ilmanvaihtokoneilla sisäolosuhteiden tarkkaa hallintaa varten. Testitalo tuottaa mittaustietoja vähintään viiden vuoden ajalta, mutta ensimmäiset tulokset ovat saatavilla jo syksyllä 2023. Tässä julkaisussa tullaan esittämään testitalon liitos- ja elementtiratkaisuja sekä tutkimuksessa käytettäviä tutkimusmenetelmiä.

1. Johdanto

Rakennuksilla on merkittävä vaikutus energiankulutukseen, sillä pelkästään rakennusten energiankäyttö on noin 40 prosenttia Suomen energian loppukulutuksesta. Rakennuksilla ja sisäilman laadulla on myös suuri merkitys ihmisten terveydelle, sillä ihmiset viettävät suurimman osan ajastaan sisätiloissa. Samalla rakentamisessa käytettävien elementtien liitoskohtien ilmatiiviydellä on tärkeä rooli sekä rakennuksen energiatehokkuudessa että sisäympäristön ilmanlaadussa. Paikallinen kosteuden konvektio rakennuksen vaipan läpi voi aiheuttaa vakavia kosteusvaurioita rakenteisiin [1] ja vaikuttaa sisäilman laatuun [2]. Kirjallisuudessa on saatavilla useita tutkimuksia rakennusten ilmatiiviydestä ja siihen liittyvistä mittaustekniikoista [3]. Ilmatiiviyttä on tutkittu sekä laboratoriokokeissa että erilaisten simulaatioiden ja mallien avulla [4,5]. Vaikka useimmat näistä tutkimuksista väittävät, että simulaatiot korreloivat hyvin todellisten mittaustulosten kanssa, joidenkin parametrien, kuten työn laadun ja ympäristöolosuhteiden mallintaminen on edelleen vaikeaa [3]. Lisäksi tarvitaan jatkuvasti lisää empiiristä kenttätutkimusta olemassa olevien mallien parantamiseksi ja täydentämiseksi. Mallien ja laskennan kehittäminen ja validointi on tärkeää rakenne- ja LVIS-suunnittelun käytänteiden standardisoinnin ja osaamisen kehittämiseksi alalla.

Rakennusten ilmatiiviyttä on tutkittu myös kenttäkokeilla, jossa vaikuttavina tekijöinä ovat olleet

puurunkoisten talojen rakennustavat ja eristemateriaalit, hirsitalojen saumaeristysmateriaalit sekä rakennusten kattorakenteet. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että ilmatiiviiden keskiarvot eivät täytä Suomessa suositeltua ilmatiiviystasoa, mutta kuitenkin yksittäisten talojen hyvä ilmatiiviyys saavutettiin kaikissa taloryhmissä rakenteesta, kerroksista, ilmanvaihtojärjestelmästä tai rakennustekniikasta riippumatta. [6]. Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että lisätutkimuksia rakennusten ilmatiiviydestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä tarvitaan tulevaisuudessakin. Jotta voitaisiin ymmärtää eri tekijöiden vaikutus ilmatiiviyteen ja parantaa olemassa olevia malleja ja simulaatio-ohjelmia, on tärkeää tehdä kenttätutkimuksia todellisilla toleransseilla ja materiaaleilla. Samalla on erittäin vaikeaa tehdä hyvin kontrolloituja kenttätutkimuksia todellisessa käytössä olevissa rakennuksissa. Näissä käytössä olevissa rakennuksissa on mahdollista seurata käytön aikana tapahtuvia muutoksia, mutta erilaisten olosuhteiden muuttaminen ja parametrien simulointi on usein lähes mahdotonta.

Tämän vuoksi käynnistettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa Etelä-Savon maakuntaliiton (Kestävää kasvua ja työtä 2014–2020 Suomen rakennerahasto-ohjelma TL 8 REACT - EU:n EAKR toimenpiteet) ja alan teollisuuden rahoittama PUUTIKO-hanke (Puu- ja hybridirakenteiden liitosten tiiveyden ja kosteuskäyttäytymisen hallinta). Tutkimushankkeen päätavoitteena on rakentaa Savonlinnan teknologiapuistoon tutkimusalusta, jossa tullaan tutkimaan erilaisten puu- ja hybridirakenteiden liitosten tiiviyyttä ja kosteuskäyttäytymistä kenttäolosuhteissa. Tavoitteena on myös simuloida erilaisia ääriolosuhteita ja seurata ilmanlaatua rakennuksessa sen rakentamisen ja käytön aikana.

2. Liitosten tiiveys ja kosteuskäyttäytyminen

2.1 Testausalusta

Osana PUUTIKO-hanketta Savonlinnan teknologiapuistoon rakennetaan 2-kerroksinen testirakennus, joka varustetaan aidoilla teollisilla materiaaleilla, liitoksilla ja toleransseilla. Kenttätestaukseen tarkoitettua ympäristöä käyttävät hankkeen toteuttajat ja sidosryhmäverkosto.



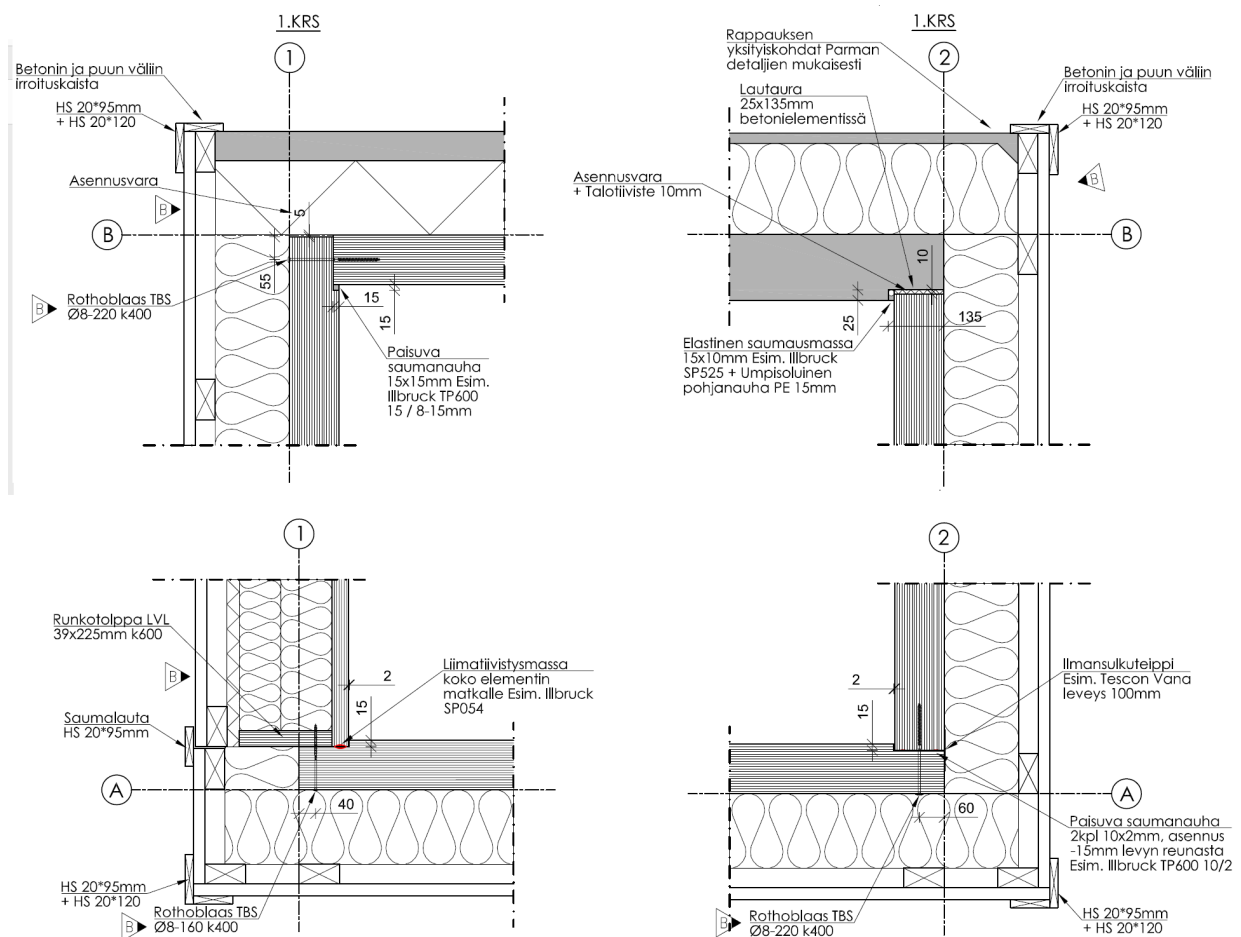
Kuva 1. Savonlinnan teknologiapuistoon rakennettava testausalusta.

Teollisen puurakentamisen kannalta tärkeiden liitos- ja materiaaliratkaisujen toimivuutta demonstroidaan tutkimusalustalla ulko-olosuhteissa. Tutkimustyön päätavoitteena on tutkia rakennuksen ulkovaipan ilma- ja höyrytiiviyttä sekä selvittää puurakenteiden kosteuselämisen vaikutus rakenteiden välisten liitosten toimintaan. Testirakennukseen asennetaan pientalon ilmanvaihtojärjestelmä, jota tarvitaan vaadittujen olosuhteiden tuottamiseksi rakennukseen.

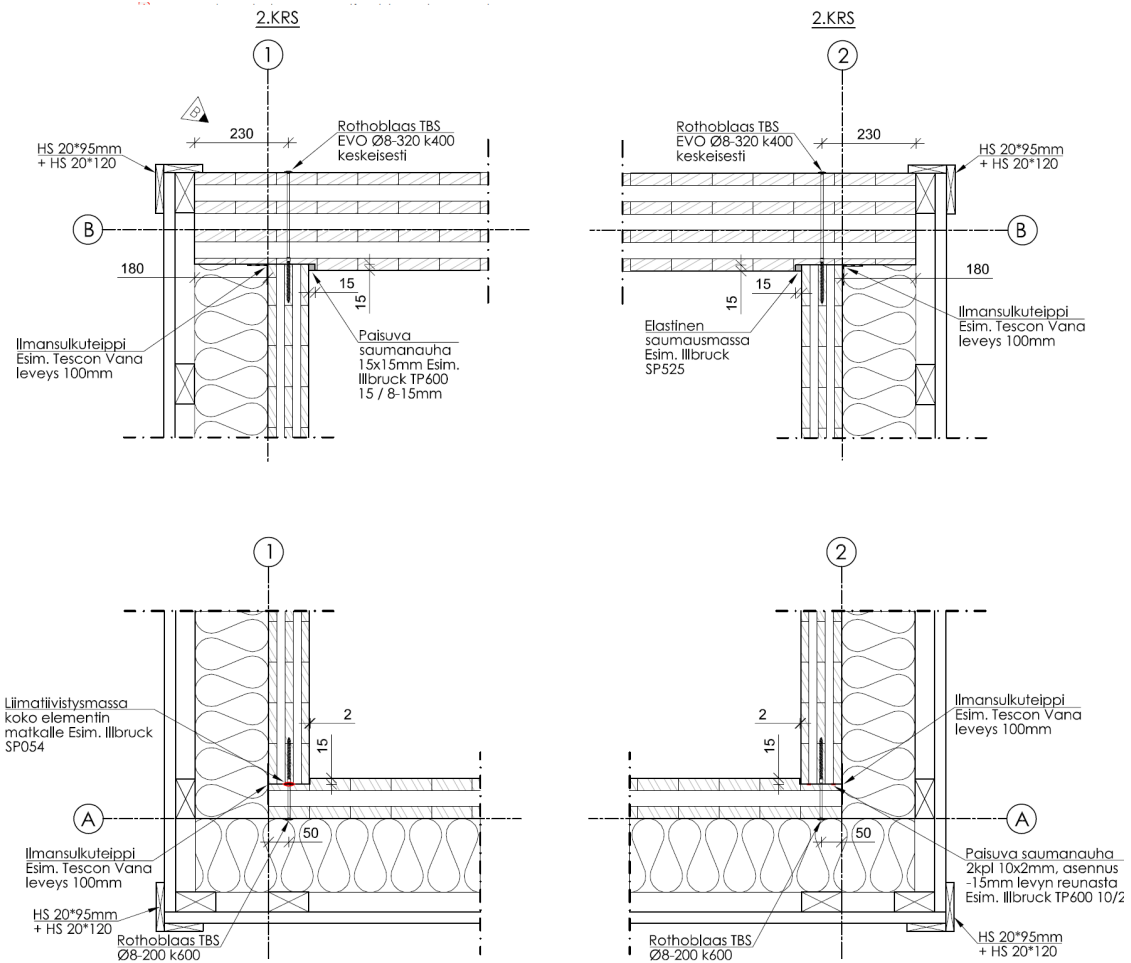
Testirakennuksen ala-, väli- ja yläpohjaelementit valmistettiin CLT-levyistä. Testirakennuksen 1. kerroksen ulkoseinät valmistettiin LVL- ja LVL-betoni-hybridi sandwich-elementeistä, joiden valmistuksen aikana tehtaalla niihin asennettiin anturit seuraamaan elementtien hygrotermistä käyttäytymistä. Testirakennuksen 2. kerroksen ulkoseinäelementit valmistettiin CLT-levyistä. Vesikattorakenne toteutettiin kantavan CLT-rungon päälle LVL-levyistä ja -palkeista valmistetuista kattoelementeistä. Testirakennukseen on asennettu 14 ikkunaa ja kaksi ovea.

2.2 Tarkasteltavat liittymät

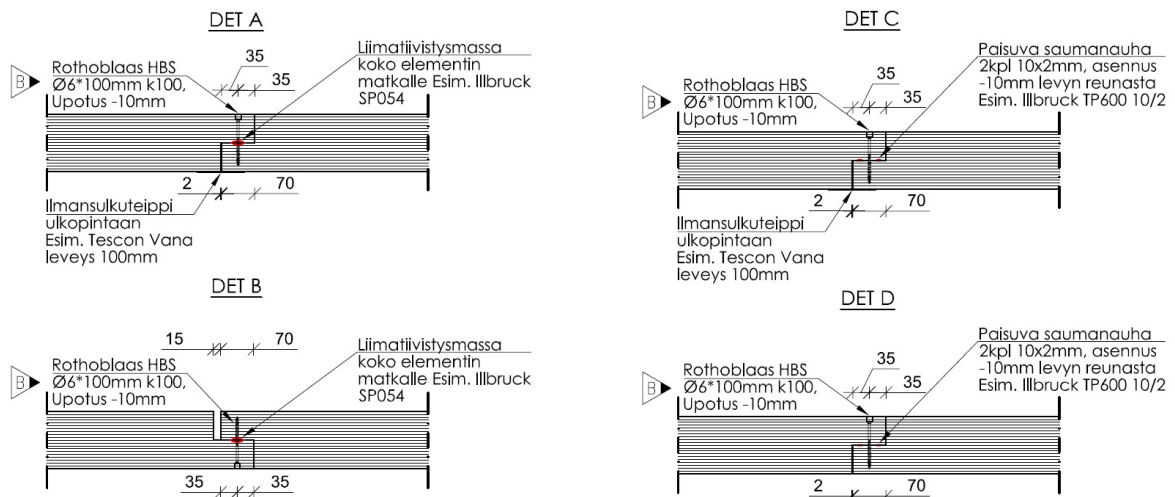
Testirakennuksen ensimmäinen kerros muodostuu LVL ja LVL-hybridi-elementeistä ja näiden elementtien kulmaliitokset ovat esitetty kuvassa 2. Toisen kerroksen elementit ovat valmistettu CLT-elementeistä (Kuva 3). Elementtien jatkoliitokset ovat kuvattu kuvissa 4 ja 5.



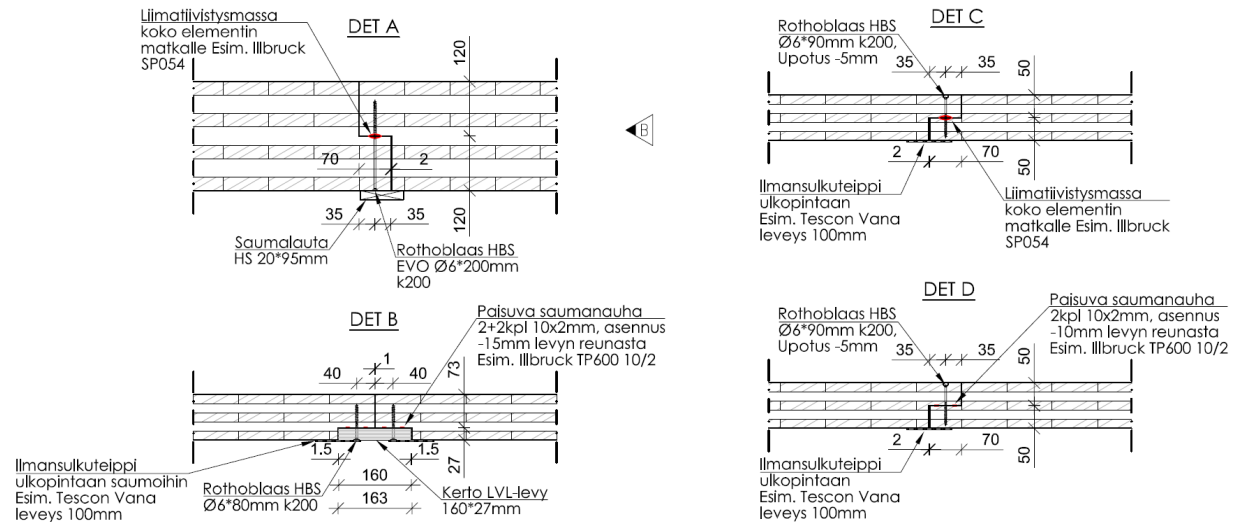
Kuva 2. Testirakennuksen ensimmäisen kerroksen ulkoseinän nurkkaliitokset.



Kuva 3. Testirakennuksen toisen kerroksen ulkoseinän nurkkaliitokset.



Kuva 4. Testirakennuksen ensimmäisen kerroksen jatkoliitokset.



Kuva 5. Testirakennuksen toisen kerroksen jatkoliitokset.

2.3 Tutkimusmenetelmät

Testirakennuksessa tehtävä tutkimus painottuu erityisesti rakennusosien välisten liittymien ilma- ja höyrytiiviyteen, mutta tarkastelun alla on myös sisäilman laatu vaihtelevissa olosuhteissa koko testirakennuksen rakentamisen ja käytön aikana. Testirakennus varustetaan nykyaikaisilla rakenteiden ja elementtien sisään asennettavilla antureilla ja tiedonkeruujärjestelmillä. Rakenteiden toimivuuden monitoroinnissa hyödynnetään myös mm. lämpökameratekniikkaa.

Testirakennuksessa käytettävät anturit voidaan jakaa laajasti kolmeen tasoon, joista ensimmäisen tason muodostavat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun 3K-elektronikkatehtaalla valmistetut lämpötilan (T) ja kosteuden (RH) mittausanturit (160 kpl). Toinen taso koostuu kaupallisista LoRaWAN (Low Power Wide Area Networking) verkkoa hyödyntävistä etäluettavista antureista (Taulukko 1). Kolmas taso muodostuu uusista ja kehityksen alla olevista anturiratkaisuista, joita tullaan asentamaan vielä lisää testirakennukseen sen käytön aikana.

3K T/RH anturit asennetaan testirakennuksen liitoksiin sekä seinärakenteiden eri kerroksiin (elementtien pintaan ja sisään, höyrysulun alle ja päälle, villatilaan sekä tuuletusrakoon)

Taulukko 1. Testirakennuksessa käytettävät kaupalliset anturit.

Anturi	Mitatavat parametrit	Lukumäärä (kpl)
IOTSU® L3 DP01	Paine-ero	10
IOTSU® Rugged AQ09	PM2.5 ja PM10, CO ₂ , TVOC, lämpötila, ilmankosteus.	3
Elsys ELT-2-HP	Sisäänrakennetut sensorit lämpötilan ja suhteellisen ilmankosteuden mittaamiseen.	12
Elsys EMS	Sensori oven asennon, lämpötilan, kosteuden ja kiihtyvyyden mittaamiseen.	3
Milesight AM319 HCHO	Laite mittaa lämpötilaa, kosteutta, valaistusta, ilmanpainetta sekä hiilidioksidin, formaldehydin ja ylimääräisten yhdisteiden (TVOC) ja pienhiukkasten määrää, ja havaitsee liikkeen PIR-sensorilla.	1
Milesight EM300-TH	Säänkestävä lämpötila- ja kosteusmittari	1

3. Yhteenveto

Etelä-Savon maakuntaliiton ja alan yritysten rahoittamassa PUUTIKO-hankkeessa rakennetaan Savonlinnan teknologiapuistoon 2-kerroksilinen testirakennus kenttätutkimusta varten. Hankkeessa pääpainopiste kohdistuu puu- ja hybridirakenteiden liitosten ilmatiiviiden ja kosteuskäyttäytymisen tutkimiseen kenttäolosuhteissa. Testirakennuksessa on käytössä erilaisia puu- ja hybridielementtejä mm. LVL, CLT ja LVL-betoni. Testirakennus on tutkimuskäytössä vähintään seuraavat 5 vuotta ja sen aikana kerätään tutkimusdataa erilaisilla kaupallisilla ja Xamkin 3K-tehtaalla valmistetuilla antureilla. Testirakennuksen tarkoituksena on tarkkailla eri vuodenaikojen ja ääriolosuhteiden vaikutusta rakenteiden ja liitosten toimivuuteen sekä sisäilman laatuun.

Lähdeluettelo

- [1] P. J. Annila, M. Hellemaa, T. A. Pakkala, J. Lahdensivu, J. Suonketo, and M. Pentti, "Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, pp. 103–108, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.01.003.
- [2] M. J. Mendell, J. M. Macher, and K. Kumagai, "Measured moisture in buildings and adverse health effects: A review," *Indoor Air*, vol. 28, no. 4, pp. 488–499, 2018, doi: 10.1111/ina.12464.
- [3] M. Prignon and G. Van Moeseke, "Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review," *Energy Build.*, vol. 146, pp. 87–97, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.062.
- [4] J. Jokisalo, J. Kurnitski, M. Korpi, T. Kalamees, and J. Vinha, "Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 2, pp. 377–387, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.03.014.
- [5] T. Kalamees and J. Kurnitski, "Moisture convection performance of external walls and roofs," *J. Build. Phys.*, vol. 33, no. 3, pp. 225–247, 2010, doi: 10.1177/1744259109343502.
- [6] J. Vinha *et al.*, "Airtightness of residential buildings in Finland," *Build. Environ.*, vol. 93, no. P2, pp. 128–140, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.06.011.

B4. Haitta-aineet ja epäpuhtaudet

Asbestin käyttö rakennuksissa, nykytilan kartoitus

Timo Turunen, Leif Wirtanen ja Jukka Lahdensivu
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Kartoituksen taustalla on EU komission tiedonanto koskien lähestymistapaa, jolla puututaan asbestin käyttöön. Tavoitteena on päästä asbestista kokonaan eroon ja edesauttaa asbestialtistuksen riskien hallintaa. Kartoituksessa muodostettiin arvio ennen 1990-lukua rakennettujen, toistaiseksi korjaamattomien tai ennen 1990-lukua korjattujen ja siten hyvin todennäköisesti asbestia sisältävien rakennusten määrästä. Asbestin kokonaismäärää tarkasteltiin todellisten kohteiden asbesti- ja haitta-ainekartoitusraporttien perusteella. Kartoituksen perusteella asbestia voidaan arvioida olevan jäljellä 50 000–80 000 tonnia, mikä vastaa 25–40 %:a rakennuksiin käytetystä alkuperäisestä asbestin määrästä. Asbestipurkutöitä koskevan lainsäädännön todettiin olevan nykyisin Suomessa toimiva ja erittäin yksityiskohtainen, ja se kattaa kaikki rakennuksen korjaustyöhön tai purkamiseen liittyvät vaiheet. Työsuojeluviranomaisten näkemyksen mukaan asbestipurkutöitä tehdään kuitenkin ilman asianmukaista lupaa edelleen varsin yleisesti erityisesti omakotitalojen ja kerrostalohuoneistojen korjauksissa. Kartoitus toteutettiin osana ”Terveet tilat 2028” -toimenpideohjelmalla, ja sen ohjauksesta vastasi ympäristöministeriön erityisasiantuntija Tomi Marjamäki.

1. Johdanto

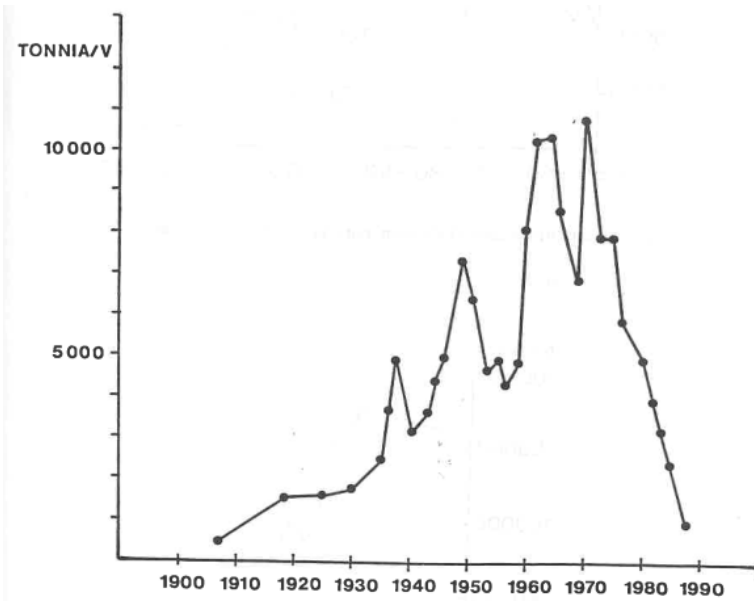
Asbestilla tarkoitetaan yleisnimikkeenä kaikkia kuitumaisia silikaattimineraaleja. Teknisiltä ominaisuuksiltaan asbesti on monipuolinen materiaali, jonka käyttöä on aiemmin lisännyt mineraalin alhainen hinta verrattuna muihin vastaaviin materiaaleihin. Asbestin ominaisuuksia ovat esimerkiksi suuri vetolujuus, helppo käsiteltävyys, muotoiltavuus ja jalostettavuus, hyvä korkeiden lämpötilojen kestävyys, hyvä lämmöneristävyys ja hyvä kemiallinen kestävyys.

Vuosina 1905–1988 asbestia käytettiin Suomessa yhteensä noin 300 000 tonnia (ks. kuva 1), josta arviolta kaksi kolmasosaa eli noin 200 000 tonnia rakennusten materiaalina.

2. Asbestin esiintyminen Suomen rakennuskannassa

2.1 Asbestia sisältävien rakennusten määrä

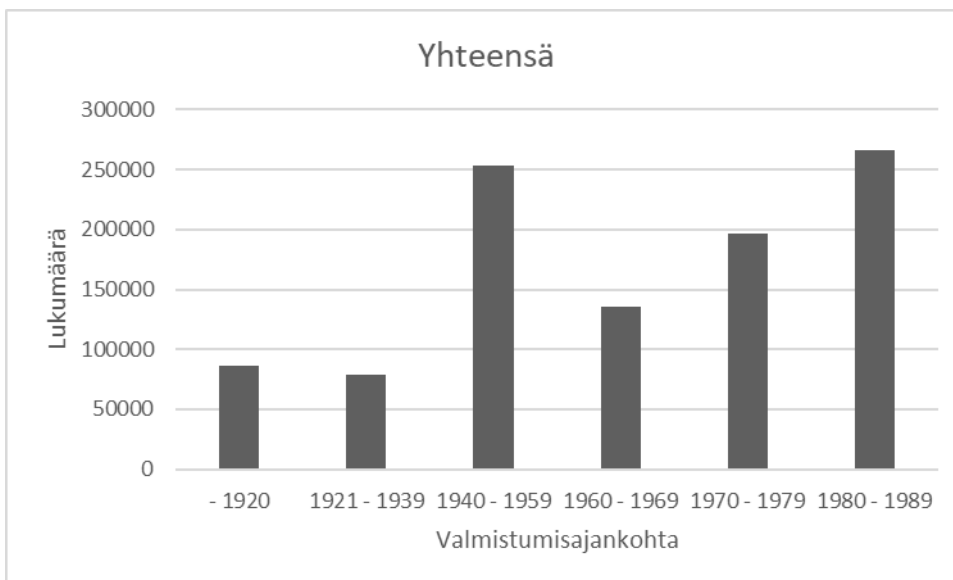
Rakennuskannan tarkastelu rajattiin ennen vuotta 1990 valmistuneisiin rakennuksiin, koska sen jälkeen valmistuneissa rakennuksissa esiintyvän asbestin määrä on hyvin vähäinen aiempiin vuosikymmeniin verrattuna. Määrätiedot kerättiin Tilastokeskuksen tilastotietokannasta ”Rakennukset käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan” vuodelta 2022 [2]. Tietokantaan eivät pääsääntöisesti sisälly kesämökkit eivätkä mm. maatalousrakennukset. Ennen vuotta 1990 valmistuneiden rakennusten määrä oli vuonna 2022 yhteensä 1 017 182 kappaletta, ja kaikkien rakennusten määrä 1 541 943 kappaletta. Ennen vuotta 1990 valmistuneet rakennukset muodostavat siis noin kaksi kolmasosaa (66 %) nykyisestä rakennuskannasta.



Kuva 1. Asbestin käyttö Suomessa vuosina 1905–1988. [1]

Kuvassa 2 on esitetty rakennusten kokonaismäärä ryhmiteltynä Tilastokeskuksen tilastotietokannan mukaisten valmistumisajankohtien mukaan.

Mitään yleistä tietokantaa peruskorjattujen rakennusten määrästä ei ole saatavilla, joten tarkastelussa tukeuduttiin muutamilta suurilta kiinteistönomistajilta saatuihin tietoihin. Kiinteistönomistajien tiedot rakennuskantaan tehtyjen peruskorjausten ajankohdasta ja sisällöstä olivat kuitenkin osin puutteellisia.



Kuva 2. Kaikkien ennen vuotta 1990 valmistuneiden rakennusten lukumäärä vuonna 2022.

Asbestin esiintymisen arvioinnin osalta rakennukset jaettiin seuraaviin ryhmiin:

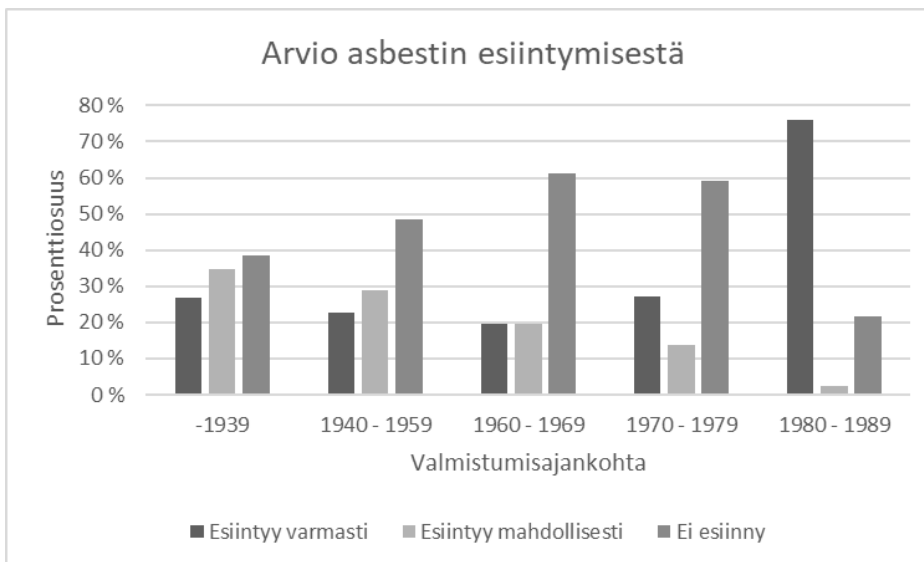
1. Esiintyy varmasti: ennen vuotta 1990 rakennetut, peruskorjaamattomat rakennukset ja ennen vuotta 1990 peruskorjatut rakennukset
2. Esiintyy mahdollisesti: 1990-luvulla peruskorjatut ja valmistuneet rakennukset
3. Ei esiinny: 2000-luvulla peruskorjatut ja valmistuneet rakennukset.

Ensimmäiseen ryhmään kuuluvissa rakennuksissa voidaan lähes varmasti olettaa esiintyvän asbestia, koska asbestipitoisia materiaaleja valmistettiin vielä 1980-luvulla, erityisesti sen alkupuolella, yleisesti. Toisaalta on olemassa 1980-luvulla valmistuneita rakennuksia, joissa ei ole lainkaan käytetty asbestipitoisia materiaaleja.

Toiseen ryhmään kuuluvissa rakennuksissa esiintyy mahdollisesti asbestia. 1990-luvulla toteutetuissa peruskorjauksissa käytäntö asbestia sisältävien rakennusmateriaalien poistamisen suhteen vaihteli huomattavasti. Osassa ne poistettiin kauttaaltaan, osassa ne poistettiin joistakin rakennusosista (esimerkiksi helposti irrotettavat rakennuslevyt purettiin väliseinistä, mutta vaikeasti poistettava lattialiima jätettiin), mutta joissakin kohteissa niitä ei poistettu lainkaan.

Kolmanteen ryhmään kuuluvissa rakennuksissa ei lähtökohtaisesti esiinny asbestia. 2000-luvun alusta alkaen on peruskorjauksissa yleensä pyritty poistamaan asbestipitoiset materiaalit, mutta näin ei ole kaikissa tapauksissa toimittu, koska velvoitetta ehjien asbestipitoisten materiaalien poistamisesta ei ole. Lisäksi on mahdollista, että kaikkia asbestia sisältäviä materiaaleja ei ollut havaittu kohteisiin tehtyjen asbestikartoitusten yhteydessä eikä niitä sen vuoksi ole poistettu.

Kuvassa 3 on esitetty esimerkkinä arvio asbestipitoisten materiaalien esiintymisestä ennen vuotta 1990 valmistuneissa palvelurakennuksissa. Tulosten perusteella voidaan todeta, että ennen 1970-lukua valmistuneissa rakennuksissa on keskimäärin vähemmän asbestipitoisia materiaaleja sisältäviä rakennuksia kuin 1970- ja 80-luvun rakennuskannassa. Ero johtuu siitä, että vanhemman rakennuskannan peruskorjaukset ovat ajoittuneet 2000-luvun puolelle. Poikkeuksen muodostavat 1900-luvun alkuvuosikymmeninä valmistuneet rakennukset, joita on peruskorjattu ensimmäisen kerran 1970- ja 80-luvulla, mutta joihin ei vielä ole tehty toista peruskorjausta.



Kuva 3. Arvio asbestipitoisten materiaalien esiintymisestä ennen vuotta 1990 valmistuneissa palvelurakennuksissa.

2.2 Arvio asbestin määrästä nykyisessä rakennuskannassa

Rakennuksissa jäljellä olevan asbestin määrää selvitettiin käymällä läpi eri-ikäisistä ja erityyppisistä rakennuksista laadittuja asbesti- ja haitta-ainetutkimusraportteja. Raporteista kerättiin kohdekohtaisesti asbestipitoisten rakennusmateriaalien määrät. Sen jälkeen laskettiin kunkin rakennusmateriaalin sisältämän asbestin määrä [kg], kun tiedetään kunkin materiaalin

paksuus, tiheys ja asbestipitoisuus. Rakennusmateriaaleista erityisesti painavimmat materiaalit, kuten asbestisementtilevyt, putkieristeiden magnesiaeristysmassat, magnesiaalattiamassat yms. muodostavat massaltaan suurimman osan rakennuksissa esiintyvistä asbestista. Apuna arvioinnissa käytettiin julkaisua [3].

Tämän jälkeen laskettiin edellä mainittujen tyyppirakennusten asbestin määrä rakennuksen pinta-alaa kohti [kg/m^2]. Tulokset olivat tyyppirakennuksittain seuraavat:

- 1950–1960-luvulla valmistunut tai peruskorjattu oppilaitosrakennus keskimäärin $0,35 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$ (vaihteluväli $0,32\text{--}0,59 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$)
- 1960–1970-luvulla valmistunut kerrostalo keskimäärin $0,31 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$ (vaihteluväli $0,13\text{--}0,45 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$)
- 1970–1980-luvulla valmistunut palvelurakennus keskimäärin $0,40 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$ (vaihteluväli $0,25\text{--}0,68 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$).

Yksittäisiä kohteita esiintyi, joissa jokin käytetty tuote (ruiskutus, lattiamassa) nosti määrän jopa $4,4 \text{ kg}/\text{br}\text{-m}^2$. Rakennuksen bruttopinta-alaa kohti lasketun asbestin määrän, kartoituksessa tarkasteltujen rakennusten valmistumis- ja peruskorjausajankohdan sekä koko Suomen rakennuskannan erityyppisten rakennusten pinta-alatietojen perusteella tehtiin arvio rakennuksissa jäljellä olevan asbestin määrästä. Kartoituksen perusteella Suomen rakennuskannassa on jäljellä asbestia yhteensä 50 000–80 000 tonnia, mikä vastaa 25–40 % kaikesta Suomessa rakennuksiin käytetystä asbestista.

3. Asbesti rakennuksia ja rakentamista koskevassa lainsäädännössä

3.1 Rakennuksen terveydelliset olosuhteet

Asumisterveysasetuksen [4] mukaan asbestikuitujen esiintymistä pinnoille laskeutuneessa pölyssä pidetään toimenpiderajan ylittymisenä. Lisäksi asetuksessa säädetään, että sisäilman asbestikuitujen pitoisuus ei saa ylittää $0,01 \text{ kuitua}/\text{cm}^3$. On huomattava, että asetuksessa määritelty toimenpideraja koskee asbestikuitujen esiintymistä sisäilmassa eikä ehjien ja kiinteiden rakennusmateriaalien sisältämää asbestia.

3.2 Asbestikartoitus

Asbestikartoituksia alettiin tehdä ensimmäinen kerran 1980- ja 90-lukujen vaihteessa. Tuolloin annettujen ohjeiden mukaan käytössä oli kustannusten säästämiseksi kaksi erilaista kartoitustyyppiä: kiinteistön normaalista käytöstä aiheutuvan asbestialtistumisen kartoitus ja peruskorjausta varten tehtävä täydellinen asbestikartoitus [3]. Ensimmäisessä tapauksessa tarkistettiin silmämääräisesti asbestipitoisten helposti pölyävien tarvikkeiden kunto. Jälkimmäiseen kartoitustyyppiin sisältyi tilojen, taloteknisten järjestelmien, rakennuksen vaipan ja rakenteiden sisältämän asbestin kartoitus. Silmämääräiseen tarkasteluun perustuva kartoitus oli käytössä peruskorjaushankkeissa vielä 2010-luvulla, vaikka täydellinen asbestikartoitus edellytettiin ohjeiden mukaan tehtäväksi jo suunnittelun alkuvaiheessa.

Valtioneuvoston asetuksen asbestityön turvallisuudesta [5] mukaan rakennuttajan on huolehdittava asbestikartoituksen tekemisestä. Käytännössä kaikissa ennen vuotta 1994 valmistuneissa rakennuksissa tulee varmistua, sisältävätkö purettavat rakenteet asbestia. Asbestikartoituksen tekemiseen on nykyisin olemassa erittäin kattavat RT-ohjekortit niin tutkimuksen tilaajaa [6] kuin tutkimuksen tekijää [7] varten. Asbestin esiintyminen rakennusmateriaalissa on varmistettava laboratorioanalyysin perusteella.

Tämän kartoituksen yhteydessä kysyttiin aluehallintoviraston työsuojelun vastuualueiden näkemystä asbestikartoitusten nykytilanteesta: Asbestikartoitukset ovat olleet pääsääntöisesti vaatimustenmukaisia, mutta joissakin kohteissa kartoitusten kattavuudessa on ollut puutteita tai kartoitus on jätetty tekemättä ennen purkutöiden aloittamista. Puutteina mainittiin, että kaikkia rakenteita, jotka olisi voitu purkamatta selvittää, ei ollut selvitetty ja ettei raporteissa ollut mainintaa rakenteiden sisässä mahdollisesti esiintyvistä asbestista. Tyypillisesti kartoitus puuttui kerrostalohuoneistojen keittiö- ja kylpyhuoneremonteissa, vesivahinkokorjauksissa, pientalojen purkutöissä sekä teollisuustilojen sisäpuolisissa purkutöissä.

Asbestikartoituksen tekijältä edellytetään riittävää perehtyneisyyttä asbestiin, sen esiintymiseen ja rakenteiden purkamiseen sekä suunnitellun kartoituksen laadun ja laajuuden edellyttämää ammatillista osaamista [5]. Kartoittajan pätevyys voidaan osoittaa esimerkiksi rakennusterveysasiantuntijan (RTA) koulutuksella, asbesti- ja haitta-aineasiantuntijan (AHA) koulutuksella tai muulla tavoin. Lainsäädännössä ei siis ole mitään yksityiskohtaista koulutus- ja kokemusvaatimusta asbestikartoituksen tekijälle. Keväällä 2023 sertifioituja AHA-asiantuntijoita oli 215 kappaletta ja RTA-asiantuntijoita 423 kappaletta.

3.3 Asbestipurkutyö

Asbestipurkutyöhön ryhtyvän työnantajan on tehtävä asbestipurkutyötä varten asbestikartoituksen sekä työn vaarojen selvittämisen ja arvioinnin perusteella kirjallinen turvallisuussuunnitelma. Asbestipurkutyöstä on tehtävä kirjallinen asbestipurkutyön ennakoilmoitus työsuojeluviranomaiselle. Työsuojelun vastuualueille tehdyn kyselyn tulosten perusteella turvallisuussuunnitelmat on laadittu kohtalaisen asianmukaisesti, mutta suunnitelmien olevan yleisluontoisia. Yleisimmät puutteet purkutyön suorituksessa olivat liittyneet purkutyöalueen osastointiin ja alipaineistukseen. Ennakoilmoituslomakkeet oli täytetty hyvin, mutta niitä ei läheskään aina ollut toimitettu riittävän ajoissa etukäteen työsuojeluviranomaiselle.

Korjaus- ja muutostyön käyttöönoton yhteydessä rakennuttajan on kirjattava tiedot rakenteisiin jäävistä asbestia sisältävistä materiaaleista rakennuksen huoltokirjaan [8]. Havainnollisinta on merkitä huoltokirjan liitteeksi laadittaviin kerroskohtaisiin paikannuskaavioihin asbestia sisältävät rakennusosat. Jotkin rakennusvalvonnat ovat alkaneet tarkastaa nämä huoltokirjatiedot.

Maankäyttö- ja rakennusasetuksen [9] mukaan rakennuksen tai sen osan purkamista koskevassa lupahakemuksessa tai ilmoituksessa on esitettävä selvitys rakennusjätteen määrästä ja laadusta sekä sen lajittelusta. Hakemuksessa tai ilmoituksessa on erikseen ilmoitettava terveydelle tai ympäristölle vaarallisesta rakennus- tai purkujätteestä ja sen käsittelystä. Asiakirjasta käytetään yleisesti nimitystä purkujätteselvitys, ja eri kunnissa on käytössä sisältövaatimuksiltaan hyvinkin erilaisia lomakkeita. Myös asbestipurkutyön suorittajan velvollisuutena on ilmoittaa asbestipurkutyön ennakoilmoituslomakkeessa asbestin sijainti, määrä ja laatu asbestikartoitukseen perustuen. Asbestin määrä ilmoitetaan siis kahteen eri järjestelmään.

4. Yhteenveto

Tämän selvityksen perusteella asbestia voidaan arvioida olevan jäljellä 50 000–80 000 tonnia, mikä vastaa 25–40 %:a alkuperäisestä asbestin määrästä. Noin 40–50 %:ssa ennen vuotta 1990 valmistuneista rakennuksissa voidaan selvityksen perusteella arvioida esiintyvän asbestia. Asbesti esiintyy yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta ehjissä rakennusmateriaaleissa kiinteässä muodossa, eikä niistä juurikaan irtoa rakennuksen normaalin käytön aikana

asbestikuituja sisäilmaan. Asbestia sisältävistä rakenteista sisäilmaan irtoavat vähäiset määrät asbestikuituja eivät käytettävissä olevan tutkimustiedon mukaan aiheuta merkittävää terveysriskiä. Rakennusten käyttäjät eivät altistu asbestille, ellei rakennuksessa ole rikkoutuneita asbestipitoisia rakennusmateriaaleja.

Asbestipurkutöitä koskeva lainsäädäntö on nykyisin Suomessa toimiva ja erittäin yksityiskohtainen. Se kattaa kaikki rakennuksen korjaus- ja muutostyöhön tai purkamiseen liittyvät vaiheet kartoituksesta jätteenkäsittelyyn. Kuitenkaan henkilöpatentteja ei ole määritelty samalla tarkkuudella.

Työsuojeluviranomaisten näkemyksen mukaan asbestipurkutöitä tehdään ns. luvatta edelleen varsin yleisesti, kyselyn perusteella useita satoja vuosittain. Todennäköisesti syynä on joko tietämättömyys (lähinnä yksityishenkilöt) tai halu välttää purun aiheuttama lisäkustannus.

Asbestin määrä on ilmoitettava sekä rakennuslupahakemuksen liitteenä olevassa purkujätteselvityksessä että asbestipurkutöiden ennakoilmoituksessa. Niiden laadinnasta vastaavat eri henkilöt ja tiedot tallennetaan eri viranomaisten järjestelmiin. Olisi suositeltavaa kehittää yhtenäiset valtakunnalliset lomakkeet ja järjestelmät, jolloin tietojen hyödyntäminen, tilastointi ja linkittäminen mahdollistuisi. Korjaushankkeen valmistuessa rakennuksen huoltokirjaan pitäisi sisällyttää tiedot rakennukseen mahdollisesti jäävästä asbestista, ja tarkastaa merkintä rakennusvalvonnan loppukatselmuksessa.

Lähdeluettelo

- [1] Työministeriö. 1990. Asbestikomitean mietintö. Helsinki, Valtion painatuskeskus. 75 s.
- [2] Tilastokeskus. 2022. Tilastotietokanta Rakennukset käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan. Tulostettavissa: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__rakke/statfin_rakke_pxt_116g.px/.
- [3] Vikström, K. 1993. Asbesti asuinkerrostaloissa. Rakennustieto Oy. 155 s.
- [4] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/2015). Tulostettavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.
- [5] Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015). Tulostettavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150798>.
- [6] RT 103500 Haitalliset aineet rakennuksissa. Tilaaajan ohje. 2022. Rakennustietosäätiö RTS.
- [7] RT 103501 Haitalliset aineet rakennuksissa. Tutkijan ohje. 2022. Rakennustietosäätiö RTS.
- [8] Työsuojeluhallinto. 2022. Asbestiasetuksen soveltamisohje. Ladattavissa: <https://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/rakennusala/asbesti/soveltamisohje-valtioneuvoston-asetus-asbestityon-turvallisuudesta>.
- [9] Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999). Tulostettavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990895>.

Rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden tutkiminen ja niiden vaikutus sisäilmaan

Paula Wuokko, Miia Pitkäranta, Pauli Sekki ja Jarno Komulainen
AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Suomen vanhassa rakennuskannassa on edelleen runsaasti polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH) sisältäviä rakennusmateriaaleja. Osan PAH-yhdisteistä tiedetään olevan vaarallisia sekä terveydelle että ympäristölle. Rakennusalalla yleisesti käytetty rakennusmateriaalin PAH-yhdisteiden summakonsentraatio PAH(16) ei yksinään kuvaa hyvin näistä yhdisteistä sisäilmalle aiheutuvia riskejä tai toimenpidetarvetta, eikä sitä tulisi käyttää korjaustarpeen arvioinnissa. Tässä artikkelissa esitellään tutkimushankkeen ”Rakennusmateriaalien sisältämien PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilman laatuun” alustavia tuloksia. Tulosten perusteella PAH-yhdisteiden materiaalipitoisuuden ja sisäilmapitoisuuden välinen suora korrelaatio on tilojen normaaleissa käyttöolosuhteissa heikko, sisäilmapitoisuuksiin vaikuttavien muiden tekijöiden takia. PAH-yhdistepitoisia materiaaleja sisältävien rakenteiden ollessa ehjiä ja ilmanvaihdon toimiessa normaalisti sisäilman mittauksilla todettu ja aistinvaraisesti arvioitu laatu olivat useimmiten hyviä, vaikka materiaalien PAH-yhdistepitoisuudet olivat korkeita. Tilan alipaineistus ja erityisesti PAH-yhdistepitoisen rakenteen rikkominen lisäsivät päästöjä.

1. Johdanto

Rakenteissa olevien PAH-yhdistepitoisten rakennusmateriaalien aiheuttamien sisäilmariskien arvioinnin tueksi on saatavilla hyvin vähän tutkimustietoa. Usein materiaaleja päädytään purkamaan varmuuden vuoksi. Osan PAH-yhdisteistä tiedetään olevan vaarallisia sekä terveydelle että ympäristölle. PAH-yhdistepitoisia, kivihilitervapohjaisia tuotteita on käytetty rakentamisessa noin 1960-luvun loppuun asti. PAH-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja on käytetty laajalti ja niitä on edelleen niin 1950-luvun rintamamiestaloissa, kuin 1900-luvun alun arvorakennuksissa.

Tämä tutkimus on toteutettu Työsuojelurahaston rahoittaman ”Rakennusmateriaalien sisältämien PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilman laatuun” -hankkeen yhteydessä vuosina 2021–2022 kerätyn tutkimusdatan pohjalta. Tutkimuksessa on keskitytty PAH-yhdisteiden sisäilmavaikutusten ja niihin vaikuttavien tekijöiden arviointiin, soveltuvien tutkimusmenetelmien vertailuun, sisäilmavaikutusten riskinarvion mallin luomiseen sekä raja-arvojen määrittämiseen yksittäisille haihtuville PAH-yhdisteille. Tulosten perusteella ehdotetaan riskinarvioon etenemismallia, jonka avulla voidaan arvioida rakenteissa olevien PAH-yhdistepitoisten materiaalien edellyttämiä mahdollisia toimenpidetarpeita.

2. Taustaa

PAH(16)-yhdisteet tarkoittavat Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston priorisoimaa PAH-yhdistelistaa. Listan ulkopuolisia PAH-yhdisteitä on tuhansia. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että PAH(16)-yhdisteet voidaan jaotella niiden sisäilmavaikutusten kannalta kahteen luokkaan. Herkästi haihtuvat PAH(16)-yhdisteet esiintyvät höyryjakeessa ja heikosti haihtuvat hiukkasjakeessa. Rakennusmateriaalien sisäilmavaikutusten osalta höyryjakeen yhdisteet ovat

olennaisempia. Fenantreeni on arvioitu naftaleenia paremmaksi merkkiaineeksi rakennusmateriaaliperäisille PAH-yhdiste-emissioille. Vanhojen PAH-yhdistepitoisella materiaalilla kyllästettyjen huokoisten tuotteiden, kuten pahvien, on todettu sisältävän vähemmän haihtuvia yhdisteitä kuin sivelymäisten tuotteiden. Sively- ja massamaisten tuotteiden pinta on tyypillisesti nahoittunut ja päästöt vähäisempiä. [1]

Sisäilman PAH-yhdistepitoisuuksille on annettu lainsäädännössä toimenpide- ja viitearvoja vain naftaleenille ja bentso[a]pyreenille. Niukasti haihtuvaa, hiukkasjakeessa esiintyvää syöpävaarallista bentso[a]pyreeniä voi esiintyä sisäilmassa lähinnä PAH-yhdistepitoisten materiaalien purkutöiden yhteydessä. [1] Yhdistekohtaiset HTP8h-arvot (haitalliseksi tunnettu pitoisuus 8 tunnin altistuksessa) on määritetty naftaleenille ($5\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja bentso[a]pyreenille ($10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). [2] Työterveyslaitos on antanut ala- ja tehtäväkohtaiset sisäilman tavoitetasot naftaleenille ($2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja bentso[a]pyreenille ($<0,01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) (muut työpaikat). [3] STM:n asumisterveysasetuksessa 545/2015 on asetettu toimenpideraja naftaleenille ($10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). [4] Asumisterveysasetuksen ja sen soveltamisohjeen sekä TTL:n tavoitetasojulkaisun mukaan sisätiloissa ei saa esiintyä naftaleenin hajua tai PAH-yhdisteille tunnusomaista ”ratapölkyn hajua”. [3–5]

Suurimmalle osalle PAH-yhdisteistä ei ole esitetty hajukynnystä. PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien, usein pistävä ”ratapölkymäinen” haju muodostuu lukuisten yhdisteiden erilaisista seoksista, eikä tiettyä hajukynnystä näille ole määritetty. Pelkän naftaleenin ”koipallomainen” haju, voi aiheutua myös muista lähteistä, eikä se näin ollen ole paras indikaattori PAH-yhdistepitoisille rakennusmateriaaleille [6]. Tieteellisessä kirjallisuudessa yksittäisille yhdisteille annetut hajukynnykset vaihtelevat suuresti. Esimerkiksi rakennusmateriaalien sisäilmavaikutusten kannalta hyviksi merkkiaineiksi todettujen naftaleenin ja fenantreenin raportoidut hajukynnykset vaihtelevat eri kirjallisuuslähteiden perusteella jopa sata- tai tuhatkertaisesti. Koska PAH-yhdisteiden hajukynnykset ovat lähtökohtaisesti matalia, sisäilman pitoisuudet eivät yleensä ole koholla, jos PAH-yhdisteiden hajua ei havaita. Hajukynnyksen ylittyminen ei sinällään välttämättä tarkoita terveyshaittaa, jos sisäilmapitoisuudet ovat matalia, mutta pelkkä haju voi aiheuttaa viihtyvyyshaittaa [6].

Rakennusmateriaalien PAH-yhdistepitoisuuksille ei ole annettu tai aiemmissa tutkimuksissa määritetty sisäilmaperusteisia raja-arvoja. Haitta-ainetutkimusten yhteydessä mahdollisesti PAH-yhdisteitä sisältävistä materiaaleista analysoidaan PAH(16)-summakonsentraatio, joka on tarkoitettu rakennusmateriaalien purkujätteenkäsittelyä varten. Materiaalin PAH(16) raja-arvon ylittyessä purettavaa materiaalia tulee käsitellä kuin vaarallista jätettä. Yksittäisille yhdisteille on annettu erikseen vaarallisen jätteen raja-arvot [7,8]. PAH(16)-summakonsentraatio ei kuitenkaan kuvaa materiaalista aiheutuvia sisäilmariskejä tai toimenpidetarvetta. Tätä raja-arvoa päädytään kuitenkin usein virheellisesti käyttämään sisäilmariskien ja rakenteiden korjaustarpeen arvioinnissa, koska muita materiaalipitoisuuden raja-arvoja ei ole saatavilla. Tässä tutkimuksessa esitellyssä hankkeessa selvitetään, voidaanko rakennusmateriaalien PAH-yhdistepitoisuuksille asettaa raja-arvoja sisäilmavaikutusten näkökulmasta, ja mitkä muut tekijät arvioinnissa tulee huomioida.

3. Rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden tutkimus

3.1 Tutkitut materiaalit ja analyysit

Tutkimuksen näytepisteet (6 kpl, N0-N5) sijaitsivat neljässä rakennuksessa, joiden rakenteissa oli todettu yksi tai useampi korkea PAH-yhdistepitoisuuksia sisältävä materiaali. Kohteina oli puu-

ja kivirakenteisia rakennuksia, joiden rakennusajankohta vaihteli 1800-luvun lopun ja 1960-luvun välillä. Kohteista kerättiin erityyppisiä näytteitä, kuten pahveja ja sivelyjä, joista analysoitiin PAH(16)-summakonsentraatio sekä PAH-yhdisteiden kokonaisemissipotentiaali bulkmenetelmällä. Lisäksi analysoitiin PAH(16)-listan ulkopuolisia haihtuvia ja muita haitallisiksi tiedettyjä PAH-yhdisteitä. Rakenteesta irrotettiin myös suuria, noin 0,5...1 m² yhteispinta-alaltaan olevia näytepaloja, joille tehtiin kammiotekniikalla suoritettava pintaemissiotutkimus (SER). Näytteiden leikkauspinnat kapseloitiin laboratoriossa. PAH-yhdistepitoisen materiaalin sijainti ja laajuus rakenteessa selvitettiin. Lisäksi tutkittujen tilojen olosuhteita kuten ilmanvaihdon toimivuutta ja mahdollisia virhelähteitä arvioitiin sekä mitattiin painesuhteet, lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus. Tässä artikkelissa on esitetty osa mittaustuloksista. Hankkeen varsinainen tutkimusraportti julkaistaan erikseen.

Ennen materiaalinäytteiden irrottamista rakenteesta tutkimuskohteiden sisäilmasta mitattiin kaasufaasissa esiintyvät PAH(16)-yhdisteet normaaleissa käyttöolosuhteissa sekä noin 10...15 Pa alipaineessa. Sisäilmapitoisuus mitattiin myös osastoidun, alipaineistetun tilan sisältä materiaalinäytteen irrottamisen aikana. Asiantuntijat arvioivat tutkituissa tiloissa subjektiivisen hajukynnyksen ylittymistä sekä havaitun hajun luonnetta ja häiritsevyyttä em. vaiheissa. Myös rakennusmateriaalin hajua arvioitiin ja verrattiin tilan sisäilmassa havaittuun hajuun. Eri menetelmillä saatuja tuloksien ja aistinvaraisten havaintojen välistä korrelaatiota arvioitiin.

3.2 Tutkitut rakenteet ja tilat

Taulukossa 1 on esitetty tutkimuskohteista kerättyjen materiaalien ja rakenteiden tietoja sekä ilmanäytteiden ja materiaalinäytteiden tuloksia.

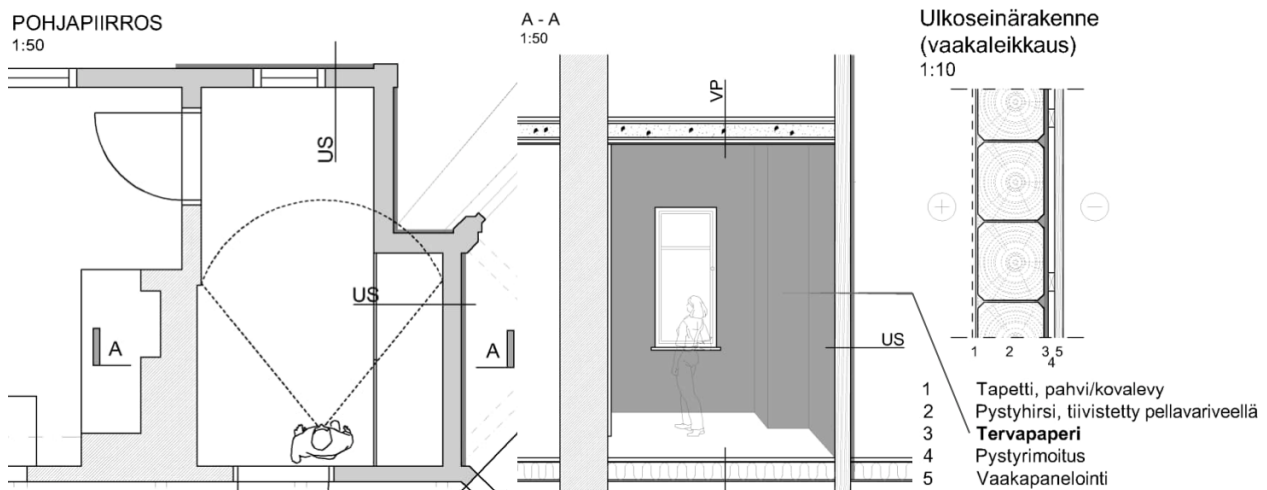
Taulukko 1. Tutkittujen materiaalien tietoja ja analyysituloksia.

Näyte	Materiaali	Rakenne / rak.vuosi	Materiaalipitoisuus [mg/kg]			Sisäilman pitoisuus [µg/m ³]		
			PAH(16)	Naftaleeni	Fenantreeni	Normaali käyttötilanne	Alipaine 10...15 Pa	Materiaalia purettaessa
Massamaiset rakennusmateriaalit								
N0	Piki-sively	Alapohja 1958	59 000	3 300	11 000	naftaleeni 0,23 fenantreeni 0,09 PAH(16) 0,80	naftaleeni 0,23 fenantreeni 0,06 PAH(16) 0,89	naftaleeni 22 fenantreeni 0,16 PAH(16) 27,72
N1	Valuasfaltti	Kellarin seinä 1860	26 000	2 200	2 000	naftaleeni 0,39 fenantreeni 0,03 PAH(16) 1,10	naftaleeni 1,7 fenantreeni 0,03 PAH(16) 2,84	naftaleeni 410 fenantreeni 2,1 PAH(16) 473
N2	Pikimassa	Välipohja 1929	2 400	< 1,0	300	naftaleeni 0,22 fenantreeni 0,09 PAH(16) 1,11	naftaleeni 0,94 fenantreeni 0,59 PAH(16) 3,82	naftaleeni 0,53 fenantreeni 0,12 PAH(16) 1,14
Huokoiset rakennusmateriaalit								
N3	Tervapaperi	Ulko-seinä 1926	11 000	< 10	850	naftaleeni 2,1 fenantreeni <0,03 PAH(16) 3,1	naftaleeni 1,4 fenantreeni <0,03 PAH(16) 2,21	naftaleeni 0,42 fenantreeni 0,03 PAH(16) 1,01
N4	Korkkilevy	Sisäkatto 1929	34 000	63	3 700	naftaleeni 0,94 fenantreeni 0,12 PAH(16) 2,33	naftaleeni -* fenantreeni -* PAH(16) -*	naftaleeni 30 fenantreeni 7,3 PAH(16) 64,74
N5	Tervapahvi	Julkisivu 1870	20 000	< 23	2 400	naftaleeni 0,04 fenantreeni 0,27 PAH(16) 0,69	naftaleeni 0,04 fenantreeni 1,40 PAH(16) 1,93	naftaleeni -* fenantreeni -* PAH(16) -*

- *ei mitattu

Tutkimuksissa tilan olosuhteisiin ja materiaaliin pyrittiin vaikuttamaan mahdollisimman vähän. Koska tilat olivat todellisia kohteita, liittyy tutkimuksiin mahdollisia virhelähteitä. Esimerkiksi tilojen olosuhteet eivät olleet vakioituja, millä voi olla vaikutusta yhdisteiden haihtumisnopeuteen ja hajuaistimukseen. Alla on tarkennettu näytekohdaisia tietoja, hajuhavaintoja ja mahdollisia virhelähteitä. Haju on asiantuntijoiden kohteessa tekemä subjektiivinen arvio PAH-yhdisteisiin viittaavasta hajusta. Tarkemmat tiedot tutkituista tiloista ja materiaaleista tullaan esittämään hankkeen tutkimusraportissa. Alla on esitetty esimerkki yhdestä tutkimuskohteesta.

N5: Julkisivun tervapahvi. Materiaalia oli pystyhirsirakenteisen kohteen julkisivulla vaakapaneloinnin alla. Kohteen rakenteet (ulkoseinät, ala- ja välipohja) olivat hyvin epätiivitä, Ympäröivissä rakenteissa ei havaittu muita PAH-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja. Paksussa tervapaperissa oli voimakas PAH-yhdisteille tyypillinen ”ratapölkyn” haju. Kohteessa havaittiin vastaavaa hajua lievänä tai kohtalaisena riippuen mm. tuuliolosuhteista. Kohteen lämpötila oli tutkimusten aikaan melko alhainen. Myöhemmissä mittauksissa lämpötilan nousun ja julkisivun kuumenemisen havaittiin kasvattavan materiaalin emissioita ja havaittavia hajuja. Kuvassa 1 on havainnollistettu tumman harmaalla PAH-yhdistepitoisen materiaalin (N5) sijaintia rakenteessa.



Kuva 1. Näytteen N5 (tervapahvi, tumman harmaa) sijainti tutkitun tilan ulkoseinärakenteessa.

4. Tulosten tarkastelu

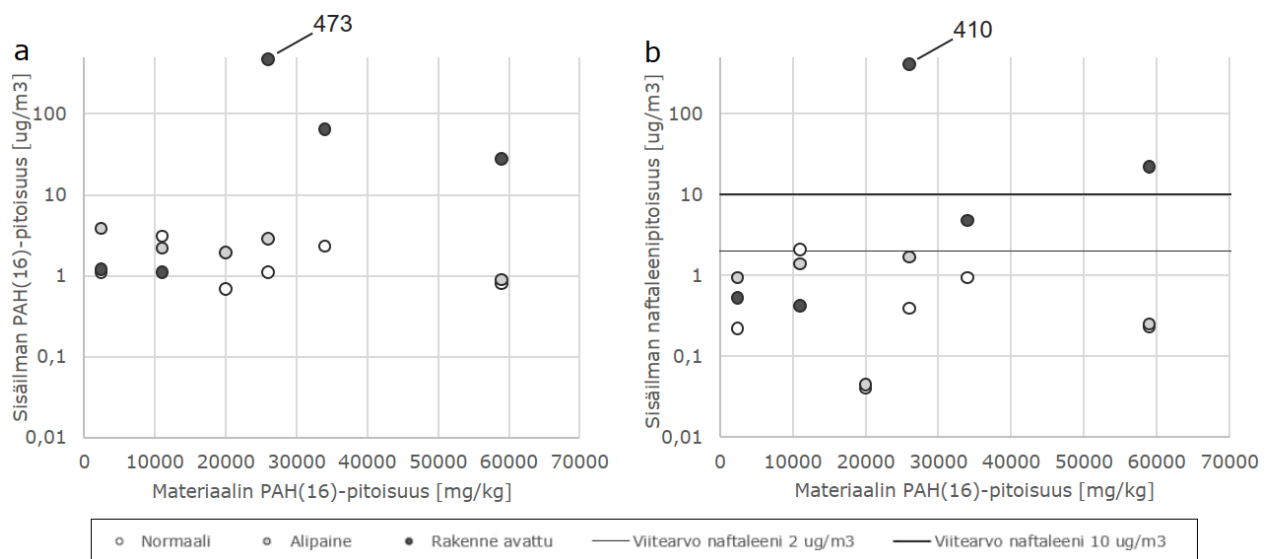
4.1 Sisäilman ja materiaalin PAH-yhdistepitoisuuksien vertailu

Tutkimusten tulosten perusteella tarkasteltiin korrelaatiota eri olosuhteissa mitattujen sisäilmapitoisuuksien, tilassa koettujen hajujen ja analysoidun rakennusmateriaalin PAH(16)-summakonsentraation välillä. Kuvissa 2a ja b on esitetty tutkittujen ilmanäytteiden tulokset, PAH(16)-summa ja naftaleenipitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eri olosuhteissa suhteessa rakennusmateriaalin todettuun PAH(16)-summakonsentraatioon mg/kg. Naftaleenin sisäilmapitoisuutta on verrattu annettuihin sisäilman toimenpide- ja viitearvoihin.

Tulosten perusteella sisäilman PAH(16)-pitoisuus ja naftaleenin pitoisuus oli kaikissa tutkituissa tiloissa matala, $<5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Rakennusmateriaalin ja normaalitilanteen sisäilmapitoisuuksien välillä ei havaittu korrelaatiota. Kun tilaa alipainestettiin, sisäilmapitoisuudet tyypillisesti nousivat. Mittausepävarmuus huomioiden naftaleenin pitoisuus ei ylittänyt toimenpide- tai viitearvoja normaalissa käyttötilanteessa tai alipaineessa mitattuna. Kun rakenteita avattiin ja PAH-

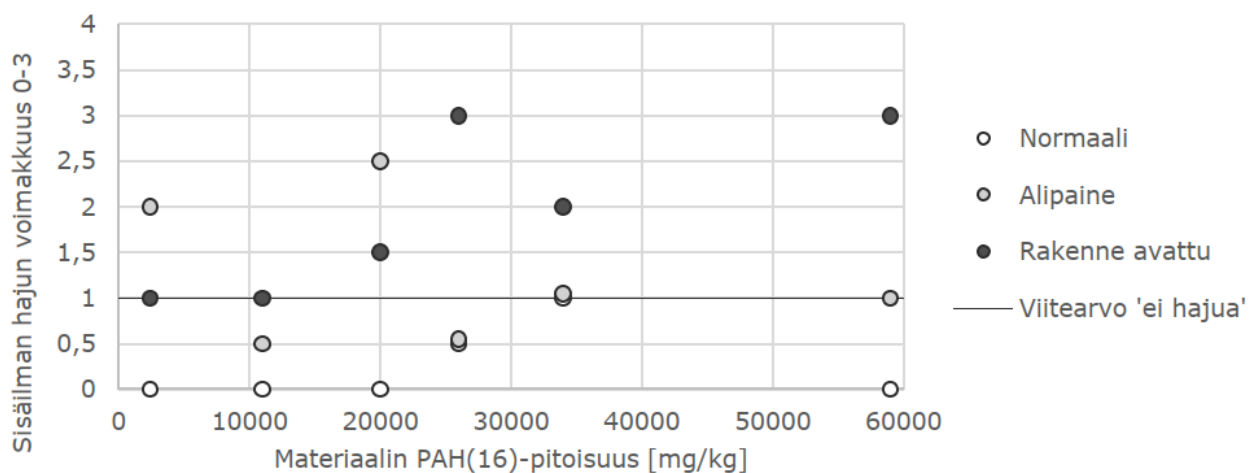
yhdistepitoista materiaalia rikottiin näytteenottoa varten, nousivat pitoisuudet tyypillisesti huomattavasti, jopa yli satakertaisesti, ja nousu oli voimakkainta, kun materiaalin PAH-yhdistepitoisuus oli korkea.

Kahdessa tilassa havaittiin myös alipaineessa ja jopa rakenteita avattaessa mitattujen sisäilman pitoisuuksien laskua. Syynä tähän on todennäköisesti alipaineistuksen ja rakenteiden avaamisen tilaa huuhteleva vaikutus. Molemmissa kohteissa, tutkitun materiaalin haihtuvien yhdisteiden osuus oli alhainen ja hajuhavainnot eivätkä sisäilman ja materiaalin PAH-yhdisteiden koostumus korreloineet hyvin. Näin ollen molemmissa tiloissa arvioitiin olevan muita (tilan ulkopuolella) olevia lähteitä, joista PAH-yhdisteitä kulkeutui tilan sisäilmaan ilmavuotojen kautta erityisesti alipainetilanteessa.



Kuva 2. Sisäilman PAH(16)- (a) ja naftaleenipitoisuus (b) eri olosuhteissa suhteessa materiaalin PAH(16)-pitoisuuteen.

Kuvassa 3 on verrattu tilassa havaitun hajun voimakkuutta ja yhteyttä materiaalin PAH(16)-pitoisuuteen. Hajun voimakkuus on luokiteltu seuraavasti; 0 = ei hajua, 1 = ajoittainen lievä, tai jatkuva hyvin lievä haju, 2 = ajoittainen selvä, tai jatkuva lievä haju ja 3 = jatkuva selvä haju.



Kuva 3. Rakennusmateriaalin PAH(16)-pitoisuuksien ja sisäilmassa aistitun hajun välinen korrelaatio.

Normaalissa käyttötilanteessa havaitun hajun voimakkuudella ei ollut yhteyttä materiaalin PAH-yhdistepitoisuuden kanssa. Normaalitilanteessa PAH-yhdisteisiin viittaavaa lievää hajua ei havaittu, tai sitä ilmeni lievänä ajoittain tai paikallisesti. Alipainetilanteessa hajua ilmeni useammin ja voimakkaampana. Rakenteen avaamisen jälkeen hajua havaittiin kaikissa tiloissa ja hajun voimakkuus oli yleensä riippuvainen materiaalin PAH-yhdistepitoisuudesta. Tarkastelussa erottuvat poikkeuksena kaksi tilaa, joissa hajuhavaintojen lähteeksi arvioitiin tilan ulkopuolista tunnistamatonta epäpuhtauslähdettä, vrt. edellä.

5. Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien PAH(16)-summakonsentraation perusteella ei voida arvioida suoraan materiaalista aiheutuvia sisäilmariskejä tavanomaisessa käyttötilanteessa tai edes tilan alipaineistuksen yhteydessä. Materiaalia rikottaessa tilaan vapautuvat emissiot, mitattu sisäilmapitoisuus ja hajuhavainnot korreloivat suhteellisen hyvin materiaalin PAH(16)-yhdistepitoisuuden ja erityisesti haihtuvien yhdisteiden osuuden kanssa. Tutkimuskohteena olleissa rakennuksissa korkeitakaan PAH-yhdistepitoisuuksia sisältäneet materiaalit eivät aiheuttaneet sisäilman laadun heikkenemistä alle viranomaisviitearvojen tason, ennen kuin materiaalia rikottiin.

Kohteiden laadullisen tarkastelun perusteella sisäilmapitoisuuteen ja koettuun hajuun vaikuttavat useat tekijät, kuten materiaalin sisältämien haihtuvien PAH-yhdisteiden määrä, haihtuvien yhdisteiden osuus kokonaismäärästä ja materiaalin pinnan eheys. Lisäksi tarkasteltavan tilan olosuhteet, kuten painesuhteet, ilmanvaihto ja lämpötila on huomioitava sisäilmariskejä arvioitaessa. Myös tilassa olevan emittoivan materiaalin pinta-ala sekä materiaalia ja huonetilaa rajaavan rakenteen PAH-yhdisteiden läpäisevyys vaikuttavat merkittävästi siihen, aiheutuuko materiaalista riskiä sisäilman laadulle vai ei.

Hankkeessa saatujen emissiotulosten perusteella tullaan mallintamaan laskennallisesti rakennusmateriaalien -emissioiden aiheuttamia sisäilmapitoisuuksia toimistotyypisissä työympäristöissä ja vertaamaan reaali-kohteissa mitattuihin tuloksiin ja koettuihin hajuhaittoihin. Alustavasti naftaleeni ja fenantreeni ovat hyviä markkeriaineita tarkasteltaessa PAH-yhdisteiden sisäilmariskejä. Tutkimusryhmän havaintojen perusteella PAH-yhdisteiden haju on harvoin naftaleenille ominaista ”koipallon” hajua tai välttämättä edes ratapölkkyistä hajua. Hajuaistimukset ovat hyvin subjektiivisia ja ne voivat vaihdella riippuen materiaalista, PAH-yhdisteiden koostumuksesta ja tilan olosuhteista. Tutkituissa näytteistä todettiin PAH(16)-listan ulkopuolisia yhdisteitä, mikä voi osaltaan selittää sisäilmapitoisuuksien ja hajuhavaintojen ristiriitoja.

Hankkeessa pyritään määrittämään suuntaviivoja rakennusmateriaalien pitoisuustasoista, joilla voi olla sisäilman laatua heikentäviä vaikutuksia. Lainsäädännössä annetun toimenpiderajan ylittymisen edellyttämiä toimia ei ole yksilöity. Turhaa, varmuuden vuoksi tehtävää purkua on suositeltavaa välttää ja suosia ensisijaisesti muita hallintamenetelmiä, pois lukien tilanteet, joissa rakenteita avataan ja puretaan muista syistä, kuten esimerkiksi linjasaneerausten yhteydessä. PAH-yhdisteitä on voinut imeytyä viereisiin rakenteisiin, jolloin purkutoimet voivat olla laajoja ja rakenteita voidaan silti joutua kapseloimaan. PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien arvioimiseen suositellaan kuvan 4 mukaista etenemismallia.



Kuva 4. Etenemismalli PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien riskien arvioimiseen.

6. Yhteenveto

Rakennusmateriaalin sisältämien PAH-yhdisteiden koostumuksella, materiaalin ominaisuuksilla, sen laajuudella sekä sijainnilla rakenteessa on suuri merkitys siitä mahdollisesti aiheutuviin sisäilmariskeihin ja hajuaistimukseen. Tässä artikkelissa tehtyjen tarkastelujen pohjana on pieni aineisto, mutta havainnot olivat yhdenmukaiset tutkimusryhmän kymmenistä tutkimuskohteista keräämään pitkäaikaisen empiirisen kokemuksen kanssa. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että pelkän materiaalin PAH(16)-yhdisteiden kokonaispitoisuuden perusteella ei voida arvioida luotettavasti materiaalin aiheuttamaa riskiä sisäilmanlaadulle. Tutkimusaineistossa rakennusmateriaalin korkeidenkaan PAH-yhdistepitoisuuksien todettu tyypillisesti aiheuttavan sisäilmanlaadun merkittävää heikentymistä. Yksittäistapauksissa haittoja todettiin kuitenkin

voivan ilmetä, erityisesti jos PAH-yhdistelmästä kohdistuu lämpökuormitusta tai alipainetilanteissa ilmapuotojen kautta. PAH-yhdisteitä sisältävien rakennusmateriaalien aiheuttamien riskien arvioimiseen suositellaan tässä artikkelissa esitettyä etenemismallia.

Lähdeluettelo

- [1] Komulainen J., Sallinen P., Parshintsev J., Tuomi T., Rakennus-materiaaliperäisten PAH-yhdisteiden vaikutus sisäilman laatuun, Sisäilmastoseminaari 2018, s. 395–400
- [2] HTP-ARVOT 2020, Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24, s. 45 ja 25.
- [3] PAH-yhdisteiden tavoitetasoperustelumuistio. Työterveyslaitos, TAVOITETASO TY-01-2010, 1.6.2010, päivitetty 2016.
- [4] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, STMa 545/2015.
- [5] Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, Osa III, Dnro 2731/06.10.01/2016 (päivitetty 8.10.2021).
- [6] Airaksinen R., Salmela A., Pitkäranta M. (2023) Kivihiilitervatuotteet asuinrakennuksissa. Tutkimuksesta tiiviisti 29/2023. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Helsinki
- [7] Wahlström M., Laine-Ylijoki J., Vestola E., Vaajasaari K. ja Joutti A. (2006) Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen. Ympäristöhallinnon ohjeita 2–2006, s. 35
- [8] Jätteen luokittelu vaaralliseksi jätteeksi – päivitetty opas. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:2.

Mikrobivaurion toteamisen haasteet. Kloorianisoli-analyysi tuomaan lisätietoa korjausrakentamiseen

Arja Asikainen, Pinja Tegelberg ja Jani Mäkelä
Labroc Oy

Tiivistelmä

Näytteenotto on mikrobianalyysien suurin mittausepävarmuuden lähde, sillä otettu materiaalinäyte kuvaa tilannetta vain kyseisessä näytteenottokohdassa. Näytteenoton haasteista johtuen sisäilmaongelmia selvitettyä voidaan päätyä tilanteeseen, että tutkimuskohteessa havaitaan hajuhaittaa, mutta materiaalinäytteen viljelytutkimusten tulokset eivät indikoi kosteusvaurioita.

Yksi selitys homevaurioon usein liitetulle tunkkaiselle hajulle voivat olla kloorianisolit. Kloorianisoleja muodostuu mikrobitoiminnan seurauksena rakenteissa käytetystä kloorifenoleilla kyllästetystä puumateriaalista. Tässä tutkimuksessa 77 Labrocin asiakasnäytteelle tehtiin sekä qPCR- että kloorianisolianalyysi. Näytteistä yli puolessa ei havaittu mikrobikasvua, mutta näistä yli 70 %:ssa havaittiin kloorianisoleja. Kloorianisolianalyysi tarjoaisi kohteessa esiintyvälle hajuhaitalle yhden selityksen. Kloorianisolin absorboituminen materiaalista toiseen tai ilman välityksellä vaikuttaa hyvin todennäköiseltä. Kloorifenolia on vuosien 1930–1990 puurakentamisessa käytetty laajalti alaohjauspuissa, ikkuna- ja kattorakenteissa. Kloorianisoleita voikin esiintyä laajasti olemassa olevassa rakennuskannassa.

1. Johdanto

Mahdollisia kosteusvaurion aiheuttamia mikrobivaurioita voidaan teknisten tutkimusten ohella analysoida tarvittaessa useammallakin menetelmällä. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat rakennusmateriaalin suoraviljely ja laimennossarjaviljely. Näillä menetelmillä havaitaan materiaalissa olevat elävät mikrobit, jotka kasvavat valituilla elatusalustoilla. DNA:han perustuvalla qPCR-menetelmällä saadaan näkyviin myös jo kuivuneet ja kuolleet mikrobikasvustot, joita ei voida enää havaita viljelymenetelmillä.

Johtopäätösten tekeminen mikrobianalyysituloksista voi olla haastavaa, varsinkin, jos kyse on ulkoilman tai maaperän kanssa yhteydessä olevasta materiaalista, jolloin mikrobit voivat olla kyseisiä ulkoisista lähteistä peräisin. Joskus taas tutkimuskohdassa havaitaan hajuhaittaa, mutta kyseisen kohdan materiaalinäytteen mikrobianalyysien tulokset eivät indikoikaan kosteusvauriota, vaan hajun lähde on jossain muualla.

Yksi selitys homevaurioon usein liitetulle tunkkaiselle hajulle voivat olla kloorianisolit (CA). Niitä ei tiettävästi ole teollisesti tuotettu, mutta 2000-luvulla tehdyissä tutkimuksissa havaittiin mikrobien, erityisesti Chaetomium ja joidenkin Penicillium sukujen, tuottavan metylaation ja deklloorauksen kautta kloorifenoleista kloorianisoleja [1,2]. Erityisesti 2,4,6-triCA ja 2,3,5,6-tetraCA ovat hyvin vahvan, tunkkaisen hajun aiheuttajia. Tätä hajua kuvataan usein mummonmökkin hajuksi, joka helposti yhdistetään homevaurioon. Joidenkin kloorianisoliyhdisteiden hajukynnys on myös hyvin matala [3].

Kloorifenoleilla kyllästetyn puun käyttö on ollut yleistä 1930–1990 luvuilla. Yleisin Suomessa

käytetty tuote on ollut KY5 ja sitä tuotettiin yhteensä 23377 tonnia vuosina 1940–84. Ky 5:n valmistus loppui helmikuussa 1984. Puutavaran käsittelytapoina on ollut upotus, linjakastelu ja sumutus [4]. Kloorifenolia sisältävien kyllästysaineiden käyttöä rajoitettiin 90-luvulla [5] ja niiden käyttö kiellettiin vuonna 2000 [6].

Kyllästys on tuonut puurakenteelle kosteudenkestävyyttä ja tästä syystä sitä on käytetty erityisesti rakenteiden alaohjauspuissa, kattorakenteissa ja ikkunanpielissä [7]. Myös muut raakapuutuotteet, kutterilastut ja purueristeet voivat olla kyllästetystä puutavarasta valmistettuja. Kloorianisolin haju myös tarttuu rakennuksen puu- ja muihin rakennusmateriaaleihin sekä rakennuksessa oleviin tavaroihin [8].

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää yhteyksiä qPCR-analyysillä havaittavan mikrobivaurion ja kloorianisolin havaitsemisen välillä. Samalla pohdittiin kloorianisolinanalyysin hyötyjä epäillyissä kosteusvauriokohteissa havaittujen hajuhavaintojen selvittämisessä.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Näyteaineisto

Tutkimusaineistoon valittiin 77 asiakasnäytettä. Näytteet olivat tulleet alun perin joko qPCR- tai kloorianisolinanalyysiin. Kaikista näytteistä tehtiin tätä tutkimusta varten molemmat analyysit. Valittuna näyttemateriaalina oli pääasiassa puu tai kutterilastu/puupuru. Mukana oli myös muutama näyte, joiden materiaali oli vaneri, lastulevy ja tuulensuojalevy.

2.2 qPCR-analyysi

Näytteitä punnittiin 0,5–5 g ja mikrobit uutettiin 0,5 % NaCl-liuokseen pitämällä näytteitä ultraäänihauteessa 30 min ja ravistelijassa 60 min. Näytesuspensiosta eristettiin DNA ja ajettiin qPCR-analyysit kolmelle ryhmälle: Homeet ja hiivat, Penicillium ja Aspergillus -suvut, sekä Streptomyces -aktinomykeettisuku. Mikrobipitoisuudet laskettiin yksikössä CE/g (soluekvivalenttia/g näytettä) ja tulokset tulkittiin kolmeen luokkaan käyttäen Labroc Oy:n akkreditoituja ja Ruokaviraston hyväksymiä tulkintarajoja. Tulkintarajat on määritetty vastaamaan laimennossarjajäljelyllä saatavia mikrobitulintoja. Tulkintaluokat olivat ”ei mikrobikasvua materiaalissa”, ”epäily mikrobikasvusta materiaalissa” ja ”selvä mikrobikasvu materiaalissa”.

2.3 Kloorianisolinanalyysi

Materiaalinäytteet käsiteltiin mikroemissiokammiossa (μ -CTE™). Näytettä punnittiin 2–5 g ja näytteestä otettiin emissiokammioista typpivirran avulla ilmanäyte Tenax-TA adsorbenttiputkeen. Näyte analysoitiin Tenax-TA putkesta TDU-GC-MS laitteistolla ja siitä määritettiin 10 kloorianisoliyhdistettä [9]. Materiaalinäytteiden menetelmä on semikvantitatiivinen ja ilmaisee materiaalista ilmaan haihtuvan kloorianisolin emissionopeuden yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$. Menetelmän yhdisteet ja määritysrajat on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Menetelmällä määritettävät kloorianisolit ja niiden määrittärajat.

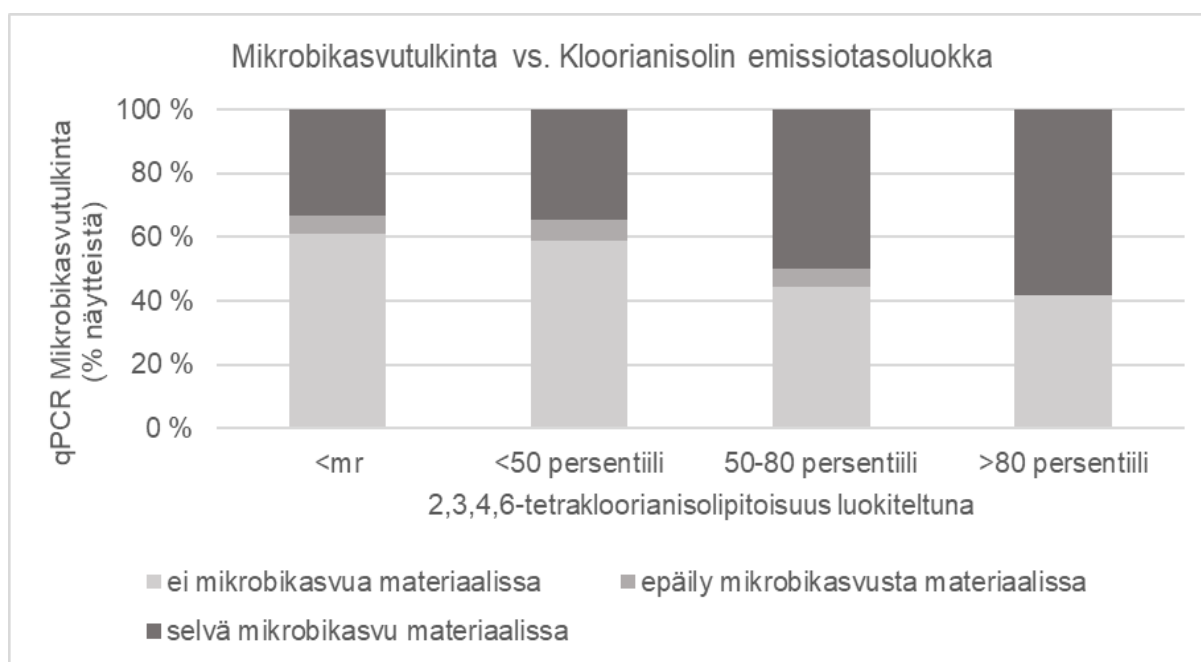
Yhdiste	Määrittäraja ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$)
2,6-dikloorianisoli	0,002
2,3-dikloorianisoli	0,003
2,4,6-trikloorianisoli	0,003
2,3,6-trikloorianisoli	0,003
2,4,5-trikloorianisoli	0,003
2,3,4-trikloorianisoli	0,003
2,3,5,6-tetrakloorianisoli	0,002
2,3,4,6-tetrakloorianisoli	0,003
2,3,4,5-tetrakloorianisoli	0,002
pentakloorianisoli	0,002

3. Tulokset

Mikrobianalyseissä havaittiin selvää mikrobikasvua 42 %:ssa näytteistä. Epäily mikrobikasvusta materiaalissa havaittiin 5 %:ssa näytteistä. 31 %:ssa näytteistä havaittiin suuri Homeet ja hiivat -ryhmän pitoisuus ja 24 %:ssa näytteistä havaittiin suuri Penicillium ja Aspergillus-ryhmän pitoisuus. 14 % näytteistä sisälsi suuren Streptomyces-aktinomykeettipitoisuuden. Mikrobikasvua ei havaittu 53 % näytteistä, mutta näistä 73 %:ssa havaittiin kloorianisoleja. Tämä havainto tukee alkuperäistä olettamustamme kloorianisoliaanalyysin hyödyistä tutkimuskohteiden hajuongelmien selvityksessä.

Kaiken kaikkiaan 77 % näytteistä havaittiin kloorianisoleja ja näistä kaikista havaittiin 2,3,4,6-tetrakloorianisolia. Joistakin näytteistä havaittiin lisäksi pentakloorianisolia ja/tai 2,4,6-trikloorianisolia. Kloorianisoliemissiotaso vaihteli $0,003\text{--}1,056 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$ välillä. Näytteistä 40 %:ssa kloorianisoliemissiotasot olivat hyvin lähellä määrittärajaa.

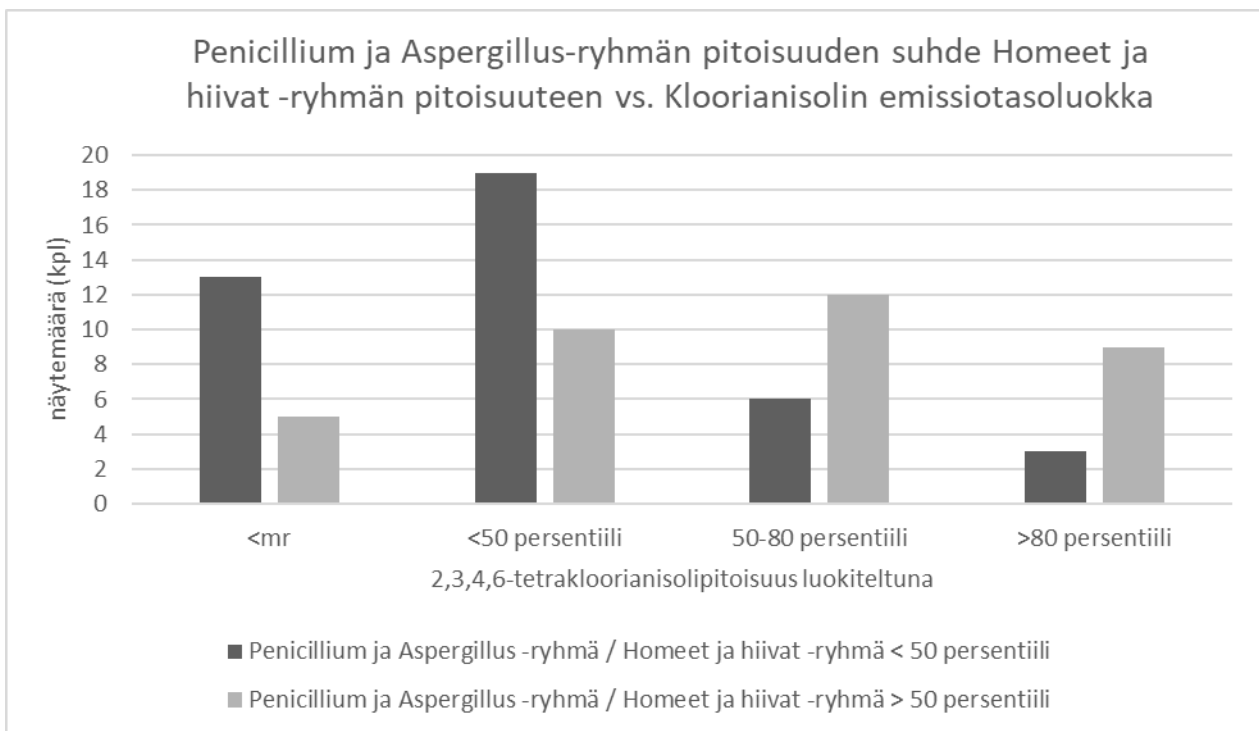
Näytteet luokiteltiin neljään eri kloorianisoliemissiotasoluokkaan näytteiden 2,3,4,6-tetrakloorianisoli-pitoisuuksien persentiilien perusteella. Luokkia tarkasteltiin qPCR-analyysin mikrobikasvuhavaintoa vasten (Kuva 1).



Kuva 1. qPCR-analyysin perusteella määritetty mikrobikasvutulkinta vs. kloorianisoliemissiotasoluokka.

Tarkastelun perusteella, vaikuttaa siltä, että mitä enemmän materiaalista emittoituu kloorianisoleja, sitä todennäköisemmin qPCR-analyysin johtopäätöksenä oli selvä mikrobikasvu materiaalissa. Mikrobitoiminnan aktiivisuus on siis yksi mahdollinen tekijä, joka voi vaikuttaa havaittuun vaihteluun kloorianisoliemissiotasossa. Matalat emissiotasot voivat olla myös seurausta ulkoilman mikrobitoiminnasta eikä varsinaisesta kosteusvauriosta. Tällöin mikrobitoiminta ei myöskään välttämättä näkyisi materiaalien mikrobitutkimuksissa.

Tarkasteltaessa kloorianisoliemissioluokkien qPCR-tuloksia tarkemmin, havaittiin, että näytteissä, joissa mikrobilajistossa havaittiin paljon *Penicillium* ja *Aspergillus*-sukujen edustajia, oli todennäköisemmin suuret kloorianisoliemissiotasot (Kuva 2). Tämä vahvistaa Gunschera ym. [1], [2] tutkimuksissa havaitsemaa käsitystä joidenkin *Penicillium*-lajien kyvystä hajottaa kloorifenoleita kloorianisoleiksi.



Kuva 2. qPCR-analyysillä saatujen *Penicillium* ja *Aspergillus* -ryhmän ja Homeet ja hiivat -ryhmän pitoisuuksien suhde vs. kloorianisolin emissioluokka.

Kloorianisolit siirtyvät suurella todennäköisyydellä suoran kontaktin tai ilman kautta alkuperäisestä materiaalista toisiin materiaaleihin. Tätä tukee myös laboratoriossamme tehty absorbaatiotesti, jossa laitettiin 100 ml kannellisiin muoviasioihin puupuraa. Puruastioihin pipetoitiin kaikkia 10 tutkittavaa kloorianisoliyhdistettä eri pitoisuuksina; käytetyt pitoisuudet olivat 0,2 ng (2 rinnakkaista), 1 ng, 4,5 ng ja 180 ng (2 rinnakkaista). Astioihin laitettiin avoimet Tenax-TA putket ja kannet suljettiin. Astiat seisoivat yön yli vetokaapissa, minkä jälkeen Tenax-putket analysoitiin. Tulokset osoittivat, että 2,6-diCA ja 2,4,6-triCA absorboituvat erittäin helposti ainakin huokoiseen Tenax:iin, ja molempia yhdisteitä löytyi jo matalimmalla pipetointitasolla (0,2 ng). Korkeimmalla pipetointitasolla (180 ng), myös 2,3,5,6-tetraCA ja 2,3,4,6-tetraCA havaittiin Tenax-putkista. Kloorianisoliyhdisteiden absorboituminen alkuperäisestä lähteestä muihin materiaaleihin voi myös osaltaan selittää aineistossamme havaittua emissiotasojen vaihtelua.

Tutkimusaineisto sisälsi ainoastaan muutaman näytteen muuta kuin puuta tai puupuraa. Aineistossa mukana olleista kahdesta vanerista, kahdesta lastulevystä ja yhdestä tuulensuojalevystä vain tuulensuojalevy ja toinen lastulevynäyte eivät sisältäneet kloorianisoleja. Tämän tutkimuksen ulkopuolelle jääneiden asiakasnäytteidemme joukossa on ollut myös tuulensuojalevynäyte, josta havaittiin varsin korkeat kloorianisoliemissiotasot. Myös sisäverhouspaneelista otetusta asiakasnäytteestä on havaittu kloorianisoleja. Käsityksemme mukaan näitä materiaaleja ei ole missään vaiheessa käsitelty kloorifenoleilla, vaan kloorianisolit olisivat päätyneet materiaaleihin absorboitumalla.

4. Yhteenveto

Tarkasteltu aineisto tukee olettamusta, että joissakin tapauksissa mikrobikasvua ei havaita materiaalinäytteessä, mutta näytteestä havaitaan kloorianisoleja. Kloorianisoliianalyysi voisi siis tuoda lisäinformaatiota mahdollisen hajuhaitan selvittämiseen. Tutkimuksessa havaittu viite yhteydestä kloorianisoliemissiotason ja qPCR:n selvän mikrobikasvun tulkinnalla voi viitata siihen, että kloorianisoliemissiotaso on korkeampi näytteissä, joissa on havaittavissa kosteusvaurion seurauksena myös mikrobikasvua ja materiaali on kloorifenoleilla kyllästettyä. Vastaavasti matalammat kloorianisoliemissiot voivat liittyä materiaaleihin, joita ei ole käsitelty kloorifenoleilla, vaan havaittu matala kloorianisoliemissio on absorboitunut materiaaliin toisesta materiaalilähteestä tai ilman välityksellä. Rakennusteknisissä tutkimuksissa jouduttaisiin tällöin etsimään kloorianisoliemissiolien ja mikrobivaurion lähdettä muista rakenteista. Kloorianisoliemissiolien absorboituminen on toistaiseksi vähän tutkittu aihe. Absorboitumisen selvittäminen olisi hyödyllistä myös korjausrakentamisen suunnittelun kannalta. Myös lisätutkimus näytteessä esiintyvän mikrobilajiston ja kloorianisoleiden havaitsemisen välillä olisi tarpeellista. Esimerkiksi ulkoilman mikrobien vaikutus kloorianisoliin muodostumiseen on toistaiseksi epäselvää.

Lähdeluettelo

- [1] Gunschera, J., Fuhrmann, F., Salthammer, T., Schulze, A. and Uhde, E. 2004. Formation and emission of chloroanisoles as indoor pollutants, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 11.
- [2] Gunschera, J., Fuhrmann, F., Salthammer, T., Schulze, A., Uhde, E. and Uhde, M. 2005. Chloroanisoles as indoor pollutants originating from PCP-metabolism, *Proc. Indoor Air*, 215, 4–2158.
- [3] Lorentzen, J. C., Juran, S. A., Nilsson, M., Nordin, S, Johanson, G. 2016. Chloroanisoles may explain mold odor and represent a major indoor environment problem in Sweden. *Indoor Air* 26: 207–218. doi:10.1111/ina.12207
- [4] Vesihallitus—National board of waters, Finland. 1985. Selvitys saha- ja kyllästystoiminnan sekä uiton ja tukkien varastoinnin vesiensuojelu kysymyksistä. ISBN 951-46-8914-3. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/14a4e274-5f80-4bce-928c-bc803cdb3a47/content>. ladattu 25.7.2023.
- [5] Ympäristöministeriö, 1993. Valtioneuvoston päätös pentakloorifenolien sekä monometyyli-tetraklooridifenyylimetaanin, monometyylidiklooridifenyylimetaanin ja monometyylidibromidifenyylimetaanin markkinoille luovuttamisen ja käytön rajoittamisesta (846/1993), Helsinki: Valtioneuvosto.
- [6] Ympäristöministeriö, 2000. Valtioneuvoston päätös pentakloorifenolin sekä eräiden difenyylimetaanien markkinoille luovuttamisen ja käytön kieltäminen (143/2000), Helsinki: Valtioneuvosto.
- [7] Seppälä, Taneli, 2020. Rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyvät nykyisin säädellyt ja haitalliset aineet. LAB-AMMATTIKORKEAKOULU.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/352808/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6_Taneli_Sepp%C3%A4l%C3%A4.pdf. ladattu 25.7.2023

- [8] Ympäristöministeriö 2016. YMPÄRISTÖOPAS. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Toim. Miia Pitkäranta.

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimus_opas.pdf ladattu 25.7.2023. Ladattu 25.7.2023

- [9] Mäkelä, J., Kanniainen, T., Hänninen, M. (2019). Kloorianisoliin määritys sisäilmasta. Sisäilmastoseminaari. SIY raportti 37. Sisäilmayhdistys Ry.

Huurreveden tulokset korreloivat sisäilmaoireisiin ja vahvistavat ekologisen savikorjauksen turvallisuuden

Kirsi Vaali¹, Elisa Aattela¹, Marika Mannerström² ja Tuula Heinonen²

¹SEA-IN

²Tampereen yliopisto, BioMediTech, FICAM

Tiivistelmä

Maailmassa kaikki aine on kolmessa eri muodossa: kaasuna, kiinteänä tai nestemäisenä aineena. Suomessa on tutkittu yli 30 v. sisäilmaa tutkimusmenetelmillä, jotka mittaavat näistä kahta, kaasuja ja kiinteitä aineita. Tulokset kaasunäytteissä eivät usein ylitä toimenpiderajoja. Kiinteissä, hiukkasmaissa aineissa, näytteet otetaan 1 h aikana maljoille viljeltäväksi. Tällöin ei-toksiset mikrobit kasvavat nopeasti toksisten mikrobien yli. Näin ollen tulos ei perustu toksisuuteen vaan mikrobien tunnistukseen ja määrään. Kolmas muoto, vesi, huurretaan sisäilmasta. Sen toksisuus testataan ihmisen immunitetin soluilla, jolloin solujen kuolleisuus korreloituu sisään hengitettävän veden toksisuuteen. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla lasketaan hengitetyn veden määrä. Suomennamme tähän esitykseen jo julkaistuja biolääketieteellisiä artikkeleita. Näissä on käytetty sisäilman tutkimiseen erilaisia menetelmiä ja raportoitu altistuneiden oirekuva, ja näiden korrelaatiota sisäilman veden toksisuuteen. Vielä julkaisemattomista tuloksista esitämme savella korjatun koulun tuloksia (rakennettu 1983, korjattu 2014). Koulussa sairastuneet opettajat voivat nyt remontin jälkeen hyvin, ja luokista v. 2023 otetut huurrevesinäytteet viittaavat siihen, ettei toksisuutta löydy.

1. Johdanto

Prof. Mirja Salkinoja-Salonen ja diplomi insinööri Johanna Salo innovoivat sisäilman veden keräämisen v. 2014. Näytteen keräämiseen tarvittiin tuolloin 3–5 pv. Menetelmää kehitettiin lisää, nykyään näyte kerätään hiilihappojään avulla 1 h aikana patentoidulla E-keräimellä [1]. Kerätyn veden toksisuus testataan ihmisen immunitetin soluilla (THP-1 makrofagi soluilla) [2]. Tätä varten mitään rakenteita ei tarvitse purkaa, ja näyte edustaa todellista sisään hengitettävää ilmaa.

2. Sisäilman vesihöyry kuljettaa monia toksisia molekyyliä / biosidejä

Toksisuutta sisäilmassa aiheuttavat joko mikrobien tuottamat myrkyt, rakennusmateriaalien sisältämät biosidit sekä kiinteistöissä käytettävät puhdistusaineet. Yhteisnimitykseltä voidaan puhua toksista aineista. Vesi esiintyy huoneenlämmössä useiden molekyylien klustereina, ja vasta kiehuminen tuottaa yhden molekyylin yksiköitä, (H₂O, 18 g/mol). Klustereissa vedyn atomit sojottavat ulospäin, ja hapet ovat sisällä päin. Näin vesi pystyy kantamaan isoja molekyyliä, (paino 300–2000 g/mol). Ulospäin sojottavat vedyt mahdollistavat sen, että vesihöyry onkin maailman paras rasvaliukoisten yhdisteiden kantajana [3,4], useimmat biosidit ovatkin rasvaliukoisia.

Biosidit tunkeutuvat elimistön soluihin sisään pintajännitystä alentamalla. Emäksiset pesuaineet tunkeutuvat muovimattojen läpi tuottaen 2-etyyli-heksanolia sekä ftalaattia [5] eikä kaikkia kaasumaisia yhdisteitä edes mitata. Sisäilman vesihöyry (ns. veden klusterit) kuljettavat lukuisia biosidisiä aineita ilmaan [6]. Peräänkuulutamme ennen kaikkea paneutumista käyttöturvallisuustiedotteisiin, ei M1 tiedotteisiin.

Yli 3000 tutkitun huurreveden näytteen ja THP-1 testien jälkeen, raja-arvot on laadittu solujen kuolleisuusprosentteina varovaisuusperiaatteen mukaisesti. EU:n varovaisuusperiaate on pantava täytäntöön ennalta varautumisen periaatteen mukaisesti. Varovaisuusperiaatteen noudattaminen ei edellytä kiistatonta näyttöä. Alla olevat raja-arvot on laadittu näiden yli 3000 näytteen tulosten perusteella. Tässä viljelyn altistusaika soluille on vain 1 vrk, siksi ei voida ajatella, että raja-arvot liikkuisivat EC₅₀ ja ED₅₀ lukemissa, sillä rakennuksissa ihmisen altistusaika on pitkä. Toksisten aineiden haittavaikutukset riippuvat myös pitkälti altistusreiteistä, sekä ihmisen koosta [7].

Viljelyssä on jokaisesta huurrevesinäytteestä 6 eri analyysiä kussakin eri pitoisuudessa (10 % tai 25 % vettä/10 000 solua), ja kun kuolleisuusprosentti nousee, tulosten pitää olla tilastollisesti päteviä p-luvun ollessa yli 0,05. Laskennassa käytetään standardi deviaation tulosta (stdev).

THP-1 solujen kuolleisuus <3 % arvioidaan turvalliseksi
 3–5 % solukuolleisuus katsotaan lievästi toksiseksi
 5–10 % solukuolleisuus katsotaan kohtalaisen toksiseksi
 Yli 10 % solukuolleisuus katsotaan merkittävän toksiseksi
 Tulos 3–5 % solukuolleisuus tulkitaan, että sen aiheuttajaa on syytä etsiä.

3. Tulokset tutkituista kohderakennuksista

3.1. Ala-asteen koulurakennus

Vuosina 1953–69 rakennetusta koulusta oli tehty kuntotutkimus, jossa todettiin merkittäviä puutteita. Noin 2-v. aikana oli tapahtunut seinärakenteessa lämpimän- ja viemäriveden vuoto. Tätä hoidettiin paineistamalla sisään tulevaa ilmaa, mikä johti mikrobikasvuun. Perinteisellä menetelmällä tehtynä mikrobikasvu oli pääasiallisesti määrällisesti mitätöntä, DG18 maljalla kasvua oli 110 pesäkettä/g seinämateriaalia, muut näytteet olivat (MEA, DG18 tai THG) 0–4 pesäkettä/g. Huurreveden tulokset ovat Taulukossa 1.

Taulukko 1. THP-1 solujen kuolleisuus miinusmerkkisinä prosentteina. Viljelyyn on lisätty 10 µl tai 25 µl huurrevettä. Näytteet kellaritasosta. Sisään hengitetyn veden määrä on nyt (ml/8 h), alkuperäisessä julkaisussa tämä oli laskettuna (ml/24 h) kaavasta <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>. Näytteestä on THP-1 viljelyssä tehty 6 rinnakkaista näytettä, statistinen tulos P<0,01 ** ja P<0,001 ***.*

Kohde	RH %	T °C	ml/8 h	10 % tulos	25 % tulos	Tulkinta
Musiikkiluokka*	45,5	17,5	36,3	1,80±5,0	-15,9±5,9***	Toksinen
Musiikkiluokka*	45,5	17,5	36,3	1,5±5,5	-11,1±10,2*	Toksinen
Puutyöluokka*	32,5	18,4	14,4	-3±5,3	-12,7±3,3***	Toksinen
Käytävä*	31,2	22	42,4	-6,1±1,9**	-5,6±3,3**	Toksinen
Portaikko*	31,7	22,1	43	-1,9±2,4	-4,4±2,3**	Toksinen
1. kerros	33	21,8	42,8	-2,9±2,1	-9,6±2,6***	Toksinen
2. kerros	34,6	21,3	42,2	-2,00±3,7	-7,0±2,2***	Toksinen

Altistuneiden (n=47) koululaisten oirekuvaraportissa oli 51 % suolistovaivoja, 40 % hengitysoireita, 28 % neurologisia oireita, 55 % päänsärkyä, 38 % uupumusta, 34 % silmäoireita, 32 % ihon kutinaa, 28 % alilämpöä, 28 % korvatulehduksia, 26 % lihas- tai nivelkipuja, ja oireet erosivat tilastollisesti kontrollirakennuksen lasten (n=56) oirekuvasta [8]. Altistuneiden kunnassa

terveydenhuollon kuluissa oli yli nelinkertainen kulujen kasvu altistumisvuotena verrattuna kahteen naapurikunnan koululaisiin [8].

Myöhemmin heillä, jotka siirtyivät puhtaisiin kouluihin, vakavatkin oireet (kuten maksavauriot, epilepsiat, suolistosairaudet, pituuskasvu 12 cm/6 kk) hävisivät seuraavan 3 v aikana, mutta jatkuivat, jos koulurakennus oli sisäilmaongelmainen. Yhdellä pojalla oireet poistuivat terveessä koulussa mutta palautuivat sisäilmaongelmaisessa koulussa. Koululaisten virtsanäytteissä (n=30) oli enemmän *Penicilliumin* aineenvaihdunnan tuotetta kuin heidän vanhemmillaan (n=11), (käsikirjoitus).

3.2. Toimistorakennus, jossa sairastuminen tapahtui 3 kk sisällä

Toimistossa, jossa sijaitsi myös varastoa, oli työskennellyt 6 naista yli 10 v. ajan ilman sairastumisia. Kun toimistotilat siirrettiin, kaikki 6 henkilöä raportoivat tyypillisiä erilaisia sisäilman oireita [9]. Huurrevesinäytteet osoittivat selvää toksisuutta (Taulukko 2). Kahdesta tutkittavasta otettiin aamun virtsanäyte, josta analysoitiin 11 eri homeiden tuottamaa mykotoksiinia [10].

Työntekijöiden 1&2 virtsasta löytyi mykofenolihappoa (284 ja 50 ng/g virtsan kreatiniinia), joka on *Penicilliumin* tuottama aineenvaihdunnan tuote, noin 1,5 kk vauriorakennuksesta poistumisen jälkeen. Määritykset tehtiin massaspektrometrisesti (LC-MS/MS, Great Plains Laboratory, Lenexa, USA). Toimistorakennuksen mikrobistosta löytyi *Penicilliumin* kanta, joka voi tuottaa mykofenolihappoa. Kun virtsasta analysoitiin 11 eri mykotoksiinia, työntekijät 1&2 muistuttivat merkittävästi mykotoksiinien profiilissa toisiaan, kun taas kaksi muuta täysin ulkopuolista tutkittua naista erosivat mykotoksiinin profiilissaan toisistaan sekä työntekijöistä 1&2.

*Taulukko 2. Huurrevesi näytteiden tulokset THP-1 solujen viljelyssä. Työntekijä 1 työskenteli keskimäärin 10 h/pv toimistohuoneessa, muut 5 tutkimushenkilöä alueilla 2–4. THP-1 solujen kuolleisuus mitattiin vain yhdessä 10 % vesipitoisuudessa (10 µl huurrevettä/90 µl soluviljelyn kasvatusliuosta). Soluja kuoli toimistohuoneen näytteessä eniten, 9,5 %. Tilastollinen tulos *P<0,05, *** P<0,001.*

Näyte	RH %	T °C	THP-1 makrofagit
Toimistohuone	30,8	21,4	-9,54±1,24***
Alue 2	30,2	21,4	-2,87±2,1*
Alue 3	30,6	21,6	-6,3±2,4***
Alue 4	29,1	21,7	-6,6±1,3***

Työntekijän 1 mies poikkesi myös merkittävästi mykotoksiinin profiilissa, hänellä oli yli 6 kertaa enemmän okratoksiinia kuin vaimollaan, eikä hänellä ollut mykofenolihappoa virtsassa. Kun kodin eri huoneet tutkittiin, ei miehen makuu- tai työhuoneen THP-1 tulos osoittanut selkeää toksisuutta. Okratoksiinin löytyminen miehen virtsasta viittaa ravintoon, kun taas mykofenolihapon löytyminen työntekijöiden 1&2 virtsasta viittaa toimistorakennukseen. Mykofenolihapon pitoisuudet virtsassa olivat analysoivan laboratorion mukaan myös epätavallisen suuria. Lisäksi toimiston sisäilman huurrevedestä voitiin osoittaa pieni määrä mykofenolihappoa, vaikkakin näyte oli käsitelty useita kertoja valossa. Mykofenolihapon valoherkkyys ei silloin ollut tiedossa, ja tämä on alentanut analysoinnin tulosta.

Pieniä määriä mykofenolihappoa löytyi pohjois-suomalaisista 6/10 toimiston sisäilman huurrevedestä (16–27 pg mykofenolihappoa / ml huurrevettä) [10]. Näissä kaikissa THP-1

tuloksen mukaan oli ollut yli 5 % solukuolleisuutta. Tämä vaatii toksisuuden lähteen lisätutkimusta, potentiaalinen lähde voisi olla biosideihin kuuluva boraattipitoinen välivilla.

3.3. Oirekuva ja huurrevesitulos vaurioituneesta toimistosta verrattuna kontrollitoimistoon

Isosta 1959–67 valmistuneesta toimistorakennuksesta, joka oli korjattu 1997–2000, löytyi aiemmissa julkaisuissa monia erittäin toksisia homekantoja. Vauriorakennuksen 32 vapaaehtoista henkilöä antoi seerumi- ja ulostenäytteensä. Kontrollirakennus oli alle 1 km päässä oleva 2005 valmistunut rakennus, josta 18 henkilöä osallistui tutkimukseen. Oirekuvan kyselyssä ei kysymyksiä kohdistettu rajoitetusti sisäilmaan liittyen, vaan vastaajat kertoivat ylipäättään oireiluistaan. Altistuneista 29/32 raportoi oireita, kun taas kontrolleista raportoi 4/18, ero oli siis yli nelinkertainen. Oirekuvat osoittivat selvästi laaja-alaisia oireita, samoja oireita on kirjallisuudessa raportoitu ennenkin [8,9,11,12,13]. Huurreveden toksisuuden suhteen rakennukset erosivat selvästi, kontrollirakennus oli ei-toksinen [14].

Taulukko 3. Huurreveden aiheuttama kuolleisuus on mitattu yhtenä pitoisuutena, (10 µl/90 µl viljelyliuosta) THP-1 testissä. Menetelmään on myöhemmin lisätty 25 % analyysi. Näytteenottajia oli kaksi eri henkilöä, huomioi myös eri näytteenoton paikat.*

Näytepaikka, altistuneiden rakennus	Ottaja	THP-1 %	Statistiikka	Tulkinta
Huone 264.1 A	1	-6,2±2,9	P=0,009	Toksinen
Huone 264.1 A	2	-7,1±3,3	P=0,004	Toksinen
Huone 265.1, opiskelijat läsnä	1	-4,7±2,4	P=0,034	Toksinen
Huone 265.1, opiskelijat läsnä	2	-7,3±2,9	P=0,003	Toksinen
Huone 265.1, luokka tyhjä, poistoilma *	1	-7,8±2,9	P=0,002	Toksinen
Huone 265.1, luokka tyhjä, tuloilma *	2	-2,0±4,0	P=0,375	Ei-toks.
Ulkoilma läheltä EA.1	1	-0,8±3,9	P=0,709	Ei-toks.
Ulkoilma läheltä PS.1	2	-2,5±2,8	P=0,240	Ei-toks.
Näytepaikka, kontrollirakennus	Ottaja	THP-1 %	Statistiikka	Tulkinta
TU3 Luokkahuoneen edestä	1	0,5±7,9	P=0,872	Ei-toks.
TU5 Luokkahuoneen keskeltä	1	-3,5±5,7	P=0,246	Ei-toks.
TU7 Luokkahuoneen edestä	1	-0,8±4,6	P=0,790	Ei-toks.
A.1. Ulkoa	1	-2,3±4,3	P=0,420	Ei-toks.

Puhtaaksiviljellyt mikrobikannat mitä ilmeisimmin tappoivat 29/32 altistuneen tutkittavan basofiiliset solut 225 kertaa pienemmässä konsentraatiossa kuin mitä allergologian testeissä on käytössä, eivätkä basofiilit kuole allergiatesteissä, kuten tässä ilmeisimminkin kävi. Basofiilejä ei ole aiemmin sisäilmaongelman tilanteissa tutkittu.

4. Hankoniemen koulun savilattian tulokset

Hankoniemen koulussa oli tutkittujen kahden eri luokan 2 opettajaa ja noin 50 % oppilaista sairastunut sisäilmaongelmasta v. 2014. Koulu oli rakennettu v. 1983, rakenteessa oli betonilaatta suoraan maanvaraisesti. Arkkitehti Kasper Järnefelt oli suositellut koulun kahden luokkahuoneen korjaamista savilattialla ja seinien rappaamista savella. Muovimatto poistettiin ja betonin pinta karhennettiin, päälle valettiin savi. Rakentajia oli kahdesta eri yrityksestä, jolloin toteutus oli hieman erilainen, toisessa on pintakerrosten kulumaa paikoissa, joissa tuolin tai kaappien pyörät

ovat osittain rikkoneet pintaa [15]. Molemmista luokkahuoneista otettiin huurrevesinäytteet 23.1.23 ja tulokset ovat ei-toksiset (Taulukko 4). Samat opettajat ovat voineet toimia tiloissa jo 8 vuoden ajan. Tulos vahvistaa sen, että saven mikrobit käsittelevät alta tulevat toksiset yhdisteet ja muuntavat rakennusperäiset tVOC (total volatile organic compounds) päästöt aina hiilidioksidiksi (CO₂) asti. Savi toimii aina parhaiten, kun se saa hiukan vettä, mikä siis toteutuu luontaisesti tässä. Viitaten Prof. Mirja Salkinoja-Salosen tekemään Ecosafe 2:n raporttiin, saven laadulla ei voitu osoittaa olevan merkitystä, vaan kaikilla testatuilla savilaaduilla saatiin tVOC:n laskua kammiomittauksissa.

Taulukko 4. Hankoniemen koulun THP-1 solujen viljelyn tulos, 10 µl näyte*, 25 µl näyte**.

Luokkahuone	RH %	T (° C)	THP-1 %	Statistiikka	Tulkinta
Kuvaamataidon luokka 183 *	25	21,4	0,59±1,16	P=0,792	Ei-toks.
Kuvaamataidon luokka 183 **	25	21,4	-6,58±3,77	P=0,231	Ei-toks.
Tekstiili luokka 173 *	24,6	21,3	-0,43±2,53	P=0,893	Ei-toks.
Tekstiili luokka 173 **	24,6	21,3	-3,02±3,10	P=0,533	Ei-toks.

5. Yhteenveto

Rakennusten ilman toksisuus on kunnille merkittävä taloudellinen taakka, mikä näkyi koululaisten tutkimuksessa. Pahimmat altistumiset tuottavat lopulta lukuisia erilaisia oireita ja uupumusta estäen työn tai opiskelun kokonaan. Aiemmin ei ole juurikaan raportoitu oireiden häviämistä, kun vakavasti sisäilmasta sairastunut on siirtynyt sisäilmaltaan puhtaaseen rakennukseen. Tätä ei yleisesti ole raportoitu, mutta savikorjauksen jälkeen siitä on esimerkki. Olemassa olevien ongelmarakennusten savikorjaamisella pystyttäisiin miljoonien eurojen säästöihin: rakennusten purkamisen ja uudelleenrakentamisen sekä terveydenhoidon kuluissa. Valtioneuvostolla on myös ekologisen siirtymän EU rahoitusta, jota on järjetöntä olla käyttämättä. Rakennukset pitäisi vielä testata rakentamisen tai korjaamisen jälkeen olemassa olevilla perinteisillä laskeuma- ja kaasunäytteillä sekä huurreveden ja THP-1:n menetelmillä, jotta korjaamisen tarve ja riittävyys tulee varmistettua.

Monien eri toksisten yhdisteiden haitallista yhteisvaikutusta on lähes mahdotonta osoittaa, tähän menisi todella paljon aikaa ja rahaa sekä näiden arviointi olisi haasteellista, koska uusia rakennus- ja puhdistustuotteita tulee koko ajan lisää markkinoille. Oireita syntyy pitkäaikaisessa altistumisessa monipuolisesti eri kudoksiin. Tärkeää on myös tarkistaa kiinteistössä käytettävien pesu- ja puhdistusaineiden käyttöturvallisuustiedotteen sisältö sekä varsinkin aivan uusien rakennusten ollessa kyseessä, rakennusmateriaalien käyttöturvallisuustiedotteet.

Haastateltaessa kiinteistön teknistä henkilökuntaa saadaan selville mitä korjauksia on tehty ja mitä pesuaineita on käytetty lähiaikoina. Nämä alkukartoitukset paljastavat rakennusmateriaaleista haihtuvat kemikaalit ja biosidit sekä rakenteissa mahdollisesti olevat kosteus- ja mikrobivauriot, sillä kaikki nämä vaikuttavat kokonaistoksisuuteen.

Lopputulokset esitetyistä tutkimuksista oli, että huurrevesinäytteistä mitattu toksisuus liittyi oirekuvaan. Löydösten ollessa toksisia, rakennusten lattioiden ja seinien päällystäminen savella on yksi keino välttää rakennusten purkamisen ja uudelleenrakentamisen. On vielä liian aikaista arvioida, voivatko savikorjaukset pelastaa vaikeimmin vaurioituneita rakennuksia.

Tutkituissa kaikissa neljässä kohteessa huurrevesinäytteestä ihmisen solulinjalla saadut testitulokset (THP-1 tulos) erottivat vaurioiset rakennukset terveistä rakennuksista ja tulokset olivat linjassa oirekuvien kanssa.

Lähdeluettelo

- [1] Aattela, E. US Patent 10,502,722 B2; CA patent 2,972,162; FI 128773 B; EU 3241010 2016.
- [2] Mannerstrom, M.; Toimela, T.; Ahoniemi, J.; Anthi-Styliani, M.; Heinonen, T. Cytotoxicity of Water Samples Condensed from Indoor Air: An Indicator of Poor Indoor Air Quality. *Applied In Vitro Toxicology* 2020, 6 (4), 120-130. DOI: 10.1089/aivt.2020.0017.
- [3] Van Oss CJ; Giese RF; A., D. Hyperhydrophobicity of the water-air interface. *J of Dispersion Science and Technology* 2005, 26, 585-590.
- [4] Decker, H.; van Holde, K. L. Oxygen and the evolution of life; Springer, 2011.
- [5] Wakayama, T.; Ito, Y.; Sakai, K.; Miyake, M.; Shibata, E.; Ohno, H.; Kamijima, M. Comprehensive review of 2-ethyl-1-hexanol as an indoor air pollutant. *J Occup Health* 2019, 61 (1), 19-35. DOI: 10.1002/1348-9585.12017 From NLM Medline.
- [6] Selkäinaho, J., Harmo, P., Salkinoja-Salonen, M., Luukkaa, J., Siren, H. M., Riekkola, M-L., Andersson, A., Mikkola, R., Salonen, H., Kurnitski, J., & Visala, A. (2018). Water vapour mobilises building related non-volatile chemicals and mycotoxins and may be used to remove substances of potential healthhazard from indoor surfaces. In R. Kosonen, M. Ahola, & J. Narvanne (Eds.), *Roomvent&Ventilation 2018*, p. 91-96: Excellent Indoor Climate and High Performing Ventilation SIY SISÄILMATIETO OY.
- [7] Salkinoja-Salonen, M. Diagnostisia työkaluja rakennusten patologiaan; Helsingin yliopisto, 2016.
- [8] Hyvonen, S. M.; Lohi, J. J.; Rasanen, L. A.; Heinonen, T.; Mannerstrom, M.; Vaali, K.; Tuuminen, T. Association of toxic indoor air with multi-organ symptoms in pupils attending a moisture-damaged school in Finland. *Am J Clin Exp Immunol* 2020, 9 (5), 101-113.
- [9] Valtonen, V. Clinical Diagnosis of the Dampness and Mold Hypersensitivity Syndrome: Review of the Literature and Suggested Diagnostic Criteria. *Front Immunol* 2017, 8, 951. DOI: 10.3389/fimmu.2017.00951.
- [10] Vaali K.; Tuomela M.; Mannerström M.; Heinonen T.; Tuuminen, T. Toxic Indoor Air Is a Potential Risk of Immunosuppression and Morbidity—A Pilot Study. *Journal of Fungi* 2022, 8 DOI: 10.3390/jof8020104.
- [11] Salin, J. Luokkahuoneen sisäilman mikrobien ja pölyn toksisuudet lisäävät opettajien työympäristöön liittyvien oireiden riskiä: poikkileikkaustutkimus. Oulu: University of Oulu, 2022, <http://urn.fi/urn:isbn:9789526231921>, 2022.
- [12] Hyvonen, S.; Poussa, T.; Lohi, J.; Tuuminen, T. High prevalence of neurological sequelae and multiple chemical sensitivity among occupants of a Finnish police station damaged by dampness microbiota. *Arch Environ Occup Health* 2020, 1-7. DOI: 10.1080/19338244.2020.1781034.
- [13] Hyvonen, S.; Lohi, J.; Tuuminen, T. Moist and Mold Exposure is Associated With High Prevalence of Neurological Symptoms and MCS in a Finnish Hospital Workers Cohort. *Saf Health Work* 2020, 11 (2), 173-177. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.01.003.
- [14] Vaali, K.; Kingsley, E.; Andersson, M. A.; Mannerström, M.; Heinonen, T. In search for Clinical Markers: Indicators of Exposure in Dampness and Mold Hypersensitivity Syndrome. *Journal of Fungi* 2023, 9 (3), 332-. DOI: 10.3390/jof9030332.
- [15] Ängeslevä, P. Savetus toimii. *Kuntalehti* 2023, 5, 52-53.

Kloorianisolit sisäilmanongelman aiheuttajana – havaintoja ja johtopäätöksiä kenttä- ja laboratoriotutkimusten tuloksista

Johanna Holmström¹, Arttu Harmaala² ja Minna Lilja²

¹ Caverion Suomi Oy

² Eurofins bestLab Oy

Tiivistelmä

Kloorianisolit aiheuttavat niin kutsuttua vanhan talon hajua, joka voidaan sekoittaa myös homeiden hajuun. Yhdisteen hajukynnys on matala, ja yleisesti kloorianisoliin hajun ei katsota aiheuttavan terveyshaittaa. Kyseessä on kuitenkin suhteellisen yleisesti rakentamisessa käytetty aine, joten tulevaisuuden tulkinnat hajun haitallisuudesta ja mahdollisista korjaustavoista koskettavat useita kiinteistönomistajia niin omakotitalojen, vapaa-ajan asuntojen kuin rivitalojen ja esimerkiksi taloyhtiöiden saunatilojen osalta. Tutkimustemme mukaan kloorianisoliipitoisuudet eivät täysin korreloi mikrobikasvun kanssa, vaikka tiettyä samansuuntaisuutta on havaittavissa. Siten kloorianisolin aiheuttama hajuongelma ei ole kytköksissä aktiiviseen mikrobivaurioon. Lähtötietojen mukaan kloorianisoliin hajua on vaikea saada pois irtaimistosta. Tutkimme puuvillan pitoisuuksia ennen ja jälkeen vesipesun tai tuuletuksen, ja näiden tulosten perusteella kloorianisoliipitoisuus oli kokonaan poissa tai selkeästi vähentynyt. Kloorianisoleja sisältävässä runkopuutavarassa pitoisuus on imeytynyt materiaaliin syvälle, joten pintahionta ei auta korjaustoimissa. Tutkimusta tarvitaan vielä lisää, mutta ennen kaikkea kloorianisoliin ja niistä mahdollisesti aiheutuvien korjaustoimien merkitys on suuri kansallisvarallisuutemme näkökulmasta.

1. Johdanto

Kloorifenoleita on käytetty puu- ja sahateollisuudessa torjunta- ja puunsuoja-aineina. Suomessa kloorifenolivalmisteita on käytetty 1930-luvulta asti aina vuoteen 1993, jolloin niiden käyttöä alettiin rajoittaa ja lopullisesti niiden käyttö kiellettiin vuonna 2000. Suomessa käytetyin kloorifenolivalmiste puutavaran sinistymisen estoon oli KY-5. KY-5 käytöstä havaittiin aiheutuvan vakavia ympäristö- ja terveysvaikutuksia, minkä vuoksi sen käyttö Suomessa kiellettiin jo yli 20 vuotta sitten. [1]

Sisäilman kannalta kloorifenolit ovat merkityksellisiä etenkin niiden mikrobiaineenvaihduntatuotteiden eli kloorianisoliin vuoksi. Useissa rakennuksissa, joissa on käytetty kloorifenolivalmisteella käsiteltyjä puutuotteita, voi esiintyä tunkkaista ja epämiellyttäväksi koettua kloorianisoliin hajua. Haju tarttuu herkästi erilaisille pinnoille (tekstiili, huonekalut ym.) ja hajun poistaminen on lähtötietomateriaalien perusteella lähes mahdotonta [2]. Käytännön tutkimuksissa on kuitenkin huomattu myös viitteitä siitä, että hajun poistaminen on mahdollista, ja tässä artikkelissa on ensimmäisiä tuloksia tekstiilimateriaalin laboratoriotuloksista.

2. Kloorianisolit sisäilmaongelmakohteissa

Vanhan talon haju tai niin sanottu mummolan haju on jo pitkään ollut tunnettu termi. [4] Hajun lähteenä ovat olleet milloin homeet, vanhat rakennusmateriaalit tai jopa formaldehydi tai PAH-

yhdisteet. Kloorianisolit hajujen aiheuttajana ovat olleet tunnistettuja vasta lyhyemmän aikaa, mutta toimivat usein selittävänä tekijänä, kun poikkeukselliselle hajulle etsitään aiheuttajaa.

2.1 Kloorianisolikohteen tunnistaminen

Kloorianisoliin osuutta sisäilmaongelmassa tai hajuhaitan selvityksessä on syytä epäillä silloin, kun alla olevan listauksen useimmat kohdat toteutuvat:

- Rakennus-, laajennus- tai korjausvuosi osuu aikahaarukkaan 1930-luvulta vuoteen 1993
- Tiloissa on aistittavissa tunkkainen haju, joka voidaan tulkita esimerkiksi homeen hajuksi. Joissain tapauksissa haju voi olla mietona myös lähes miellyttävä.
- Haju voi olla vaikeasti aistittavissa mutta tarttuu esimerkiksi tiloissa olleisiin tekstiileihin herkästi jopa suhteellisen lyhyessä ajassa, esimerkiksi vuorokaudessa.
- Rakenteet pitävät sisällään puurakenteita joko runkomateriaalina tai koolauksissa. On viitteitä, että kloorifenoleita olisi käytetty myös puupaneeleissa, mutta havainnot saattavat olla yksittäistapauksia.
- Rakennusta on pidetty kylmillään jossain elinkaaren vaiheessa.

2.2 Kloorianisoliin yhteys sisäilmaan liittyvään oireiluun

Tämän hetken tietämyksen perusteella sisäilmassa esiintyvät, suhteellisen pienet mutta hajukynnyksen ylittävät pitoisuudet kloorianisoliyhdisteitä eivät aiheuta terveyshaittaa [5]. Terveystieteiden näkökulmasta asuintiloissa häiritsevät hajut katsotaan kuitenkin mahdolliseksi terveyshaitan aiheuttajaksi [3].

Kloorianisoleista aiheutuva haju saattaa laukaista etenkin homeaurioille altistuneissa henkilöissä fyysisiä oireita. Tiedossa olevien käytännön tutkimuskohteiden osalta on tiedossa tapauksia, joissa on esiintynyt mahdollisesti sisäilmaan liittyvää oireilua kuten hengitystieoireilua, äänen käheytyä ja menetystä sekä iho-oireita. Purkutöiden jälkeen tiloista ei ole löydetty kosteus- tai homeaurioituneita materiaaleja mutta kloorifenolilyydyttäneitä runkorakenteita on löydetty hajujen selittäjiksi. Kyse on toistaiseksi yksittäisistä kohteista, joten psykosomaattista oireilua ei voida myöskään jättää huomiotta oireilun tulkinnaissa.

Lisäksi poikkeuksellinen haju saattaa myös osaltaan aiheuttaa epätietoisuutta tilojen turvallisuudesta ja terveellisyydestä. Erityisesti tämä ilmiö korostuu silloin kun haju ei ole helposti aistittavissa mutta tarttuu tekstiileihin, ihoon tai hiuksiin.

3. Kloorianisoliin esiintyminen materiaaleissa

3.1 Menetelmä, kloorianisolit

Kloorianisolit kerätään mikrokammio (μ CTE) -laitteistolla johtamalla materiaalinäytteen testauskammion kautta puhdasta tyyppiä adsorptiokeräysputkeen (Tenax TA-CarboGraph 5TD). Näytteet kerätään 25 ± 2 °C lämpötilassa. Menetelmä tuottaa suuntaa antavaa tietoa materiaalista testausolosuhteissa haihtuvista kloorianisoleista. Näytteet tutkitaan käyttämällä termodesorptioon perustuvaa näytteensyöttöä, kromatografista erottelua ja massaselektiivistä ilmaisinta. Haihtuvien kloorianisoliin pitoisuudet määritetään niiden omilla standardivasteilla. Tulosten tarkastelussa kerrotaan, haihtuuko tutkitusta materiaalista kloorianisoleja määritysrajan ylittäviä pitoisuuksia. Testauskammion ilmanäytteestä analysoidut pitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ilmoitetaan testattavan näytteen tuorepainoon (g) vakioituna.

3.2 Tulokset

Vuosien 2020–2022 välisenä aikana Eurofins bestLabin laboratoriossa kloorianisolinäytteistä analysoitiin 16 kappaletta kloorianisoliyhdisteitä (kaikki di- tri-, tetra- ja pentakloorianisolit). Materiaalinäytteissä, joista mitattiin määritysrajan ylittäviä pitoisuuksia, 2,3,4,6-tertakloorianisolin esiintyvyys oli 99 %, pentakloorianisolin 52 %, 2,4,6-trikloorianisolin 45 %, 2,4,5-trikloorianisolin 14 %, 2,4-dikloorianisolin 6 %, 2,3,4-trikloorianisolin 3 % ja 2,3,4,5-tetrakloorianisolin 1 %. Muita yhdisteitä ei mitattu määritysrajan ylittäviä pitoisuuksia, joten vuoden 2022 lopussa mitattavien yhdisteiden määrää vähennettiin kuuteen kloorianisoliyhdisteeseen.

3.2.1 Case-näyte 1, lattiapalkki

Vuonna 1977 rakennetun puurakenteisen vapaa-ajan asunnon sisätiloissa aistittiin voimakasta, alun perin homeeseen viittaavaa hajua. Lattiarakenteen purkamisen yhteydessä hajua voimistui huomattavasti, mutta selkeitä, laajoja home- tai kosteusvaurioita ei havaittu. Purkutöiden yhteydessä havaittiin lattian palkiston puurakenteissa punertava pintakäsittely. Runkopuutavarassa ei tyypillisesti Suomessa ole käytetty siveltäviä pintakäsittelyjä, joten ratkaisu vaikutti poikkeukselliselta. Lattian puupalkistosta otettiin näyte, joka toimitettiin laboratorioon analysoitavaksi.

Laboratoriossa lattiapalkiston näytteestä tehtiin rinnakkaiset analyysit kolmelta käsitellyltä pinnalta sekä leikkauspinnalta. Kaikilta pinnoilta löydettiin kloorianisoleja, mutta tummemmilta pinnoilta (pinnat 1 ja 2) mitattiin suurempia pitoisuuksia ja löydettiin kaikkia mitattavia yhdisteitä, lukuun ottamatta 2,3,4,5-tetrakloorianisolia (taulukko 1). Leikkauspinnalta määritetyt pitoisuudet olivat selvästi pienemmät mitä käsitellyillä pinnalla, mutta kloorianisoleja löytyi kuitenkin yli määritysrajan.

Taulukko 1. Mitatut kloorianisoli-pitoisuudet käsitellyn puun pinnoilta.

Näyte	Pinta 1	Pinta 2	Pinta 3	Leikkauspinta
Massa (g)	2,40	2,49	2,51	2,48
Kerätty ilmamäärä (l)	4,63	4,74	4,68	4,75
Yhdiste	µg/m³g	µg/m³g	µg/m³g	µg/m³g
2,4-Dikloorianisoli	0,0200	0,0220	0,0130	0,0120
2,4,6-Trikloorianisoli	0,2800	0,3100	0,2000	0,1300
2,4,5-Trikloorianisoli	0,0060	0,0064	< 0,0041	< 0,0041
2,3,4,6-Tetrakloorianisoli	0,4400	0,4500	0,3300	0,1600
2,3,4,5-Tetrakloorianisoli	< 0,0045	< 0,0042	< 0,0043	< 0,0042
Pentakloorianisoli	0,0074	0,0061	< 0,0043	< 0,0043

3.2.2 Case-näyte 2, tekstiilimateriaalin pitoisuudet ja puhdistusmahdollisuudet

Edellisen lattiapalkkinäytteen kohteen sekä muutamien muiden case-kohteiden tutkimusten yhteydessä on vastaanotettu havaintoja siitä, että kloorianisoli-haju olisi mahdollista saada pois tekstiilimateriaaleista vesipesulla. Tätä varten tehtiin laboratorioanalyysit eri tavoin käsitellyistä näytteistä.

Näytteiden materiaali on 100 % puuvillaa sisältävä tekstiilimateriaali, jota oli aiemmin säilytetty uudehossa omakotitalossa, jossa ei ole käytetty kloorifenolipitoisia kyllästysaineita. Näytemateriaalit vietiin 1960-luvun lopulla rakennettuun vapaa-ajan asuntoon, jossa esiintyy kloorianisoleista peräisin olevaa hajua. Näytteet olivat rakennuksessa noin kahden viikon ajan. Tämän jälkeen näyte 1 pakattiin ilmatiiviisti alumiinifolioon laboratorioanalyysiä varten.

Näytettä 2 tuuletettiin ulkoilmassa kahden viikon ajan ja sen jälkeen toimitettiin laboratorioanalyysiin. Näyte 3 pestiin pesukoneessa tavanomaisella pesuaineella 60 asteen pesuohjelmalla ja kuivattiin kuivausrummussa.

Alkuperäisestä näytteestä mitattiin määritysrajan ylittävät pitoisuudet 2,3,4,6-tetrakloorianisolia ja pentakloorianisolia. Tuuletetussa näytteessä mitatut pitoisuudet jäivät alle toimenpiderajan, mutta näissä oli vielä havaittavissa piikit 2,3,4,6-tetrakloorianisolia ja pentakloorianisolia. 60 °C:ssa pestystä näytteestä ei löytynyt lainkaan kloorianisoleja. Taulukossa 2 on esitetty kangasnäytteistä haihtuvien kloorianisolioiden pitoisuudet, tuuletetun näytteen kohdalla lihavoituna yhdisteet, joita on havaittavissa näytteessä, mutta pitoisuudet jäävät alle määritysrajan.

Taulukko 2. Kangasnäytteistä mitatut kloorianisoli pitoisuudet.

Näyte	Alkuperäinen	Tuuletettu (2 vk)	Vesipesu (60 °C)
Massa (g)	2,61	2,60	2,67
Kerätty ilmamäärä (l)	4,48	4,51	4,54
Yhdiste	µg/m ³ g	µg/m ³ g	µg/m ³ g
2,4-Dikloorianisoli	< 0,0045	< 0,0045	< 0,0044
2,4,6-Trikloorianisoli	< 0,0049	< 0,0049	< 0,0047
2,4,5-Trikloorianisoli	< 0,0041	< 0,0041	< 0,0040
2,3,4,6-Tetrakloorianisoli	0,0053	< 0,0043	< 0,0041
2,3,4,5-Tetrakloorianisoli	< 0,0043	< 0,0043	< 0,0041
Pentakloorianisoli	0,0081	< 0,0043	< 0,0042

3.3 Pohdinta

Lattiapalkin tapauksessa näytteen perusteella voidaan päätellä, että vaikka mahdollinen kylläste on siveltyä vain puumateriaalin pintaan, kloorianisoliyhdisteitä löytyy myös imeytyneenä syvemmälle materiaaliin. Siten esimerkiksi pinnan hionnalla ei todennäköisesti saavuteta hajutonta lopputulosta korjaustöiden yhteydessä.

Suomessa tyypillisin tapa kloorifenolipohjaisten kyllästeiden käyttöön on ollut sahoilla kyllästysaltaissa tapahtunut käsittely. Tästä käsittelystä ei välttämättä ole nähtävissä mitään selkeää merkkiä puutavaran pinnassa. Ruotsissa on yleisesti käytetty rakennustyömailla siveltyviä homeen- ja lahonestoaineita, kuten KP-Cuprinol [6]. Näitä kemikaaleja on valmistettu eri värisinä, joten on mahdollista, että lattiapalkistossa havaittava pintakäsittely on KP-Cuprinolia tai vastaavaa valmistetta. Myös materiaalinäytteen yhdisteryhmät viittaavat tähän. Hajuhaittojen tutkimusten ja rakenneavausten yhteydessä runkopuutavaran tutkiminen kloorianisolioiden osalta on suositeltavaa.

Tekstiilimateriaalien tulokset tukevat havaintoa, että kloorianisolioiden aiheuttama haju on mahdollista saada poistettua luonnonmateriaalista vesipesulla ja myös pitkällä tuuletuksella. Case-kohteidemme havainnot tukevat tätä johtopäätöstä. Siten kloorianisoleista johtuvien hajuhaittakohteiden irtaimistoa ei välttämättä tarvitse hävittää, vaan puhdistus vesipesulla ja joissakin tapauksissa myös pitkällä tuulettamisella on mahdollista.

4. Kloorianisolin ja mikrobikasvun korrelaatio laboratorionäytteissä

4.1 Menetelmä, mikrobianalyysi

Materiaalinäytteet toimitettiin laboratorioon analyysikohtaisesti erillisissä pusseissa tai näytteet jaettiin laboratoriossa. Mikrobinäytteet säilytettiin jääkaapissa ja viljeltiin

asumisterveysasetuksen ohjeistuksen mukaisella suoraviljelymenetelmällä neljälle eri kasvatusalustalle (Hagem, 2 % Mallasuuteagar, Dikloraani- glyseroli-18-agar, Tryptoni-hiivauute-glukoosiagar) pääsääntöisesti viimeistään seuraavana arkipäivänä näytteiden vastaanottamisesta.

Näytealustat pidettiin $+25 \pm 3$ °C:ssa 7–14 vrk ajan, ja mikrobien pesäkemäärä laskettiin ja mikrobit tunnistettiin pesäkeulkonäön ja valomikroskoopissa havaittujen rakenteiden perusteella. Tulkinta pohjautuu Valviran asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen mukaiseen tarkasteluun toimenpiderajan ylittymisestä [7]. Tulkinnassa huomioidaan menetelmän laajennettu mittausepävarmuus 95 % luottamusvälillä. Toimenpiderajan alittavat, suoramikroskopointiin soveltuvat näytteet tarkastettiin erikseen kuolleen tai kuivuneen kasvuston havaitsemiseksi.

Materiaalinäytteet olivat pääosin puuta tai purua. Muita materiaaleja (lastulevy, kovalevy, kuitulevy, tuulensuojalevy, villa, pahvi ja lecasora) oli 11 % koko aineistosta.

4.2 Tulokset

Laboratoriossa analysoitiin vuosina 2022 ja 2023 yhteensä 71 materiaalinäytteestä rinnakkain kloorianisoli-yhdisteet ja mikrobit suoraviljelymenetelmällä. Kloorianisolituloksista lähes 90 % ylitti määrittäysrajan (joko yksi tai useampi yhdiste). Mikrobituloksista noin 60 % viittasi (Heikko viite tai Viite) materiaalin mikrobivaurioon eli mikrobikasvustoon materiaalissa.

Tuloksista yli 50 %:ssa määrittäysraja ylittyi kloorianisoliensa osalta ja mikrobiviljelyn tulos viittasi mikrobikasvustoon. Noin 30 %:ssa tuloksista kloorianisoliensa määrittäysraja ylittyi, mutta mikrobiviljelyn tulos ei viitannut mikrobikasvustoon.

Alle 10 %:ssa tuloksista ei ollut kloorianisoleissa määrittäysrajan ylitystä eikä mikrobiviljelyn tulos viitannut mikrobikasvustoon. Samoin alle 10 %:ssa tuloksista mikrobiviljelyn tulos viittasi mikrobikasvustoon, mutta kloorianisolitulos oli alle määrittäysrajan.

Yhteensä 63 %:ssa näytteistä tulokset olivat samansuuntaisia: Mikäli kloorianisoleissa määrittäysraja ylittyi, oli myös viite mikrobikasvustoa tai jos kloorianisoliensa määrittäysraja ei ylittynyt, ei ollut viitettä mikrobikasvustosta.

4.3 Pohdinta

Niissä tuloksissa, joissa kloorianisoliensa määrittäysraja ylittyi, mutta viitettä mikrobikasvustosta ei ollut (31 % aineistosta) vain viidesosassa näytteistä ei ollut lainkaan elävää sienikasvustoa tai aktinobakteereja. Aikaisemmin ei ole tutkittu aineenvaihduntatuotteinaan kloorianisoleja tuottavien mikrobien määriä suhteessa kloorianisoliensa määrittäysrajan tai hajukynnyksen ylittymiseen.

Tyypillisesti mikrobikasvustot ovat epätasaisesti jakautuneita, joten yksittäinen näyte antaa tiedon vain kyseisen näytteenottokohdan mikrobimäärästä ja -lajistosta näytteenottohetkellä. Suurin osa aineiston materiaaleista oli purua, jota ei hienojakoisuutensa vuoksi pystytä suoramikroskopimaan kuolleen tai kuivuneen kasvuston havaitsemiseksi.

Rakennusmateriaaleissa on voinut olla rakennuksen elinkaaren aikana sopivat olosuhteet mikrobikasvustolle, mutta materiaalin kuivuessa mahdollinen sienikasvusto on kuivunut tai kuollut tai sijaitsee muualla rakenteessa. Vaikka sienikasvusto olisi kuollut, ovat aineenvaihduntatuotteina muodostuneet kloorianisolit voineet jäädä materiaaliin.

Yksiselitteistä korrelaatiota mikrobikasvun ja kloorianisolien esiintymisen välillä ole havaittavissa, mutta kuitenkin 63 %:ssa näytteistä tulokset ovat samansuuntaisia.

Kloorianisolien esiintymistä on esimerkiksi vapaa-ajan asunnoissa, joita ei lämmitetä talviaikaan vaan ne ovat kylmillään. Tyypillisesti talvella lämmittämättömässä rakennuksessa ilman suhteellinen kosteus on korkea, vaikka lämpötila seuraa ulkoilman lämpötilaa. Siten varsinaisesti mikrobikasvulle otollisimpia olosuhteita ei synny, koska lämpötila on alhainen korkeasta suhteellisesta kosteudesta huolimatta. Toisaalta lahon muodostuminen on mahdollista matalissakin lämpötiloissa, kun ajanjakso on riittävän pitkä. Yleensä kloorianisolien aiheuttamat hajut havaitaan muutaman vuosikymmenen viiveellä rakentamisesta, eli hajujen muodostuminen ei tapahdu yhtä nopeasti kuin mikrobikasvun muodostuminen vauriokohtaan. Siten on myös mahdollista, että kosteuspiitoisuus on jossain elinkaaren vaiheessa ollut riittävä käynnistääkseen kloorianisolien muodostamisen.

5. Yhteenveto

Kloorianisolien esiintyminen on yleistä, mutta edelleen on hyvin tulkinnanvaraista, milloin kloorianisolien yhdisteet ja hajut muodostavat korjaustoimenpiteitä edellyttävän sisäilmahaitan. Selkeiden toimenpiderajojen määrittely tulee vaatimaan tutkimusta sekä käytännön kohteista että mahdollisista terveysvaikutuksista.

Lähtötietomateriaaleista poiketen ainakin osa kloorianisolikohteen irtaimistosta saattaa olla mahdollista puhdistaa hajuttomaksi joko vesipesulla tai pitkällä tuuletuksella.

Korjausten osalta rakennuksen hajuttomaksi saaminen voi vaatia laajoja korjaustöitä. Jos rakenteita on mahdollista uusia, se on suositeltavaa. Erilaiset kapselointiratkaisut yhdistettynä riittävään ilmanvaihtoon voivat myös saada aikaan riittävän tuloksen hajujen poistamisessa. Joka tapauksessa sekä kloorianisolikohteiden tutkimisen että korjaamisen osalta tarvitsemme lisää tietoa, tutkimuksia ja case-kohteita.

Lähdeluettelo

- [1] Ahola, S ”Alustavat sahojen PCDD/F-tutkimukset Pohjois-Savossa,” Pohjois-Savon ympäristökeskus, Kuopio, 1999.
- [2] Rämö, H. ”Vanhan talon haju - Tetrakloorianisoli,” Asumisterveysliitto Aste Ry, 2020. [Online]. Available: <https://www.asumisterveysliitto.fi/toiminta/artikkeliarkisto/vanhan-talon-haju-tetrakloorianisoli>. [Haettu 17.8.2023].
- [3] Terveystieteilaki 763/1994, <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940763> [Haettu 17.8.2023].
- [4] Pitkäranta, M, ym. Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus, Ympäristöopas 28, Ympäristöministeriö 2016.
- [5] Gunschera, J, ym. Formation and emission of chloroanisoles as indoor pollutants <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15259696/> [Haettu 17.8.2023].
- [6] Lorenzen, J ym. Chloroanisoles and Chlorophenols Explain Mold Odor but Their Impact on the Swedish Population Is Attributed to Dampness and Mold <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7037649/> [Haettu 17.8.2023].
- [7] Valvira, Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa IV, ohje 8/2016 (päivitetty 19.2.2020), <https://www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveydensuojelu/asumisterveys>

B5. Sisäilman olosuhteet ja laatu

Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet päiväkodeissa ja kouluissa

Tuomas Raunima¹, Anssi Laukkarinen¹, Antti Kauppinen¹, Mihkel Kiviste², Eero Tuominen¹, Joonas Ketko¹ ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

² School of Engineering, Tartu College, Tallinn University of Technology (TalTech)

Tiivistelmä

Koneellisella ilmanvaihdolla varustettujen päiväkotien ja koulujen sisäilman olosuhteita tutkittiin Tampereen yliopistolla COMBI- ja Future Spaces -tutkimushankkeissa. Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausdata yhdistettiin ja yhtenäistettiin laajaksi otokseksi, joka kuvaa käyttäjien kokemia käytönaikaisia lämpötila- ja kosteusolosuhteita. Oros edustaa lisäksi ulkovaipan rakenteiden kannalta olosuhteita, jotka vallitsevat käyttäjien aiheuttaman sisäilman kosteuskuorman ollessa läsnä. Sisäilman lämpötila todettiin vakaaksi ulkoilman lämpötilan ääriolosuhteita lukuun ottamatta, jolloin suositellut raja-arvot keskimääräisesti ylittyivät. Sisäilmayhdistyksen sisäilmastoluokitus 2018:n mukaisessa tarkastelussa kaikki tarkastellut rakennukset kuuluvat lämpötilan osalta luokkaan S3. Ilmanvaihto huuhtoo käyttäjien sisäilmaan tuottaman kosteuden tehokkaasti, minkä vuoksi sisäilman vesihöyrypitoisuus pysyy lähellä ulkoilman vesihöyrypitoisuutta. Tämä johtaa talvella hyvin matalaan sisäilman suhteelliseen kosteuteen. Kuiva sisäilma lisää vaipparakenteiden kosteusturvallisuutta, mutta liian kuiva sisäilma vaikuttaa negatiivisesti käyttäjien kokemaan sisäilman laatuun.

1. Johdanto

Ulkoilman olosuhteiden vuosittaisella vaihtelulla on merkittävä vaikutus sisäilman olosuhteisiin. Lämpöviihtyvyyden kannalta sisälämpötilan tulisi olla sopivalla tasolla sekä talvella, että kesällä. Talviolosuhteiden osalta rakennuksen lämmitysjärjestelmän tulee kyetä ylläpitämään haluttu lämpötilataso kovien pakkasolosuhteiden aikaan. Kesällä korkeaa sisäilman lämpötilaa voi esiintyä auringonsäteilyn ja sisätilojen lämpökuorman sekä rakennuksen ominaisuuksien vuoksi.

Sisäilman vesihöyrypitoisuudet riippuvat voimakkaasti rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuudesta ja sen kyvystä poistaa ylimääräinen kosteus huoneilmasta pois. Julkisten rakennusten ilmanvaihtotarve poikkeaa merkittävästi asuinrakennusten ilmanvaihtotarpeesta erilaisen käytön vuoksi. Korkeampi henkilötiheys johtaa sisäilman epäpuhtauksien, kuten hiilidioksidin suurempaan kuormaan ja tämä edellyttää asuinrakennuksia tehokkaampaa ilmanvaihtojärjestelmää sisäilman laadun pitämiseksi toivotulla tasolla. Sivuvaikutuksena julkisten rakennusten sisäilman kosteus voi huuhtoutua tehokkaammin kuin kosteusturvallisuuden ja kosteusmukavuuden näkökulmasta olisi tarpeellista.

Sisäilman suhteellinen kosteus on myös yksi keskeinen suure sisäolosuhteiden arvioinnissa. Talvella kylmän ulkoilman vesihöyrypitoisuus on hyvin matala ja sisälämpötilaan lämmittämisen myötä suhteellinen kosteus voi olla hyvin matala. Liian kuiva sisäilma voi aiheuttaa ei-toivottuja vaikutuksia, kuten ihon ja silmien ärsytystä sekä hengitystieoireita [1, luku 9]. Toisaalta myös liian korkea sisäilman suhteellinen kosteus voi aiheuttaa ei-toivottuja vaikutuksia, kuten mikrobien kasvua. Edellä kuvattujen syiden vuoksi on tärkeää ja hyödyllistä tuntea ja hallita sisäilman olosuhteita siten, että ne pysyvät suositusarvojen sisällä.

2. Menetelmät

2.1 Kenttämittaukset

COMBI-hankkeen kenttämittaukset suoritettiin vuosina 2016–2018 Pirkanmaan alueella ja Helsingin seudulla 12 uudis- ja 12 korjauskohteessa. Rakennukset koostuivat kouluista ja päiväkodeista sekä kahdesta palvelutalosta. Uudet rakennukset olivat keskimäärin viisi vuotta vanhoja. Korjatut rakennukset olivat keskimäärin 58 vuotta vanhoja ja niissä oli tehty laaja peruskorjaus keskimäärin neljä vuotta ennen mittauksia. Kahden korjauskohteen alkuperäistä rakennusta oli laajennettu uudella siivellä, joka huomioitiin tutkimuksessa erilliseksi uudiskohteeksi. Nämä seikat huomioiden tutkimushanke sisälsi yhteensä 20 yksittäistä koulu- ja päiväkotirakennusta.

Future Spaces -hanke sisälsi 12 kouluista ja päiväkodeista koostuvaa koekohdetta Pirkanmaalla sekä kaksi toimistokohdetta, joista toinen sijaitsi Tampereella toinen Helsingissä. Päiväkotij- ja koulukohteista kuusi oli mukana myös COMBI-hankkeessa. Kenttämittaukset suoritettiin vuosina 2021–2022 ja tutkittujen rakennusten joukossa oli sekä uusia että vanhoja rakennuksia. Valitut koulut ja päiväkodit sijaitsivat Pirkanmaan seudulla käytännön syistä, sillä kohdekäyntejä haluttiin tehdä säännöllisesti mittausten toimivuuden varmistamiseksi. Kohteissa oli jäähdytystä vain yksittäisissä erikoistiloissa, kuten keittiöissä.

COMBI-hankkeen kenttämittauksissa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaukset suoritettiin kahdella eri mittalaitteella. Rotronic CL11 -dataloggeria käytettiin ensisijaisena mittalaitteena sisäilman olosuhteiden mittaamisessa. Mittalaitteet hankittiin uusina ja tehdaskalibroituina tutkimushanketta varten ja laitteet sijoitettiin tiloihin, joissa mitattiin myös paine-eroa ulkovaipan yli. Samoja mittalaitteita käytettiin sisäilman olosuhteiden mittaamiseen maahantuoja-yrityksen kalibroimina myöhemmin Future Spaces -hankkeessa. Mittalaitteen mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan sisäilman olosuhteissa ± 0.3 °C ja ± 2 % RH [2].

Comark N2003 -dataloggeria käytettiin COMBI-hankkeessa toissijaisena mittalaitteena kohdekohtaisten tutkittujen tilojen määrän kasvattamiseksi. Mittalaitte oli ollut aiemmin käytössä edeltävissä tutkimushankkeissa [3–4] ja mittalaitteiden mittaustarkkuus varmistettiin ennen COMBI-hanketta kalibroimalla ne luotettavaa referenssiä vasten laboratorio-olosuhteissa. Mittalaitetta ei hyödynnetty enää myöhemmin Future Spaces -hankkeessa. Mittalaitteen mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan sisäilman olosuhteissa ± 0.5 °C ja ± 3 % RH [5].

Mittalaitteita asennettaessa tavoitteena oli, että mittaukset kuvaisivat mahdollisimman tarkasti olosuhteita hengitysvyöhykkeellä. Mittalaitteet sijoitettiin mahdollisuuksien mukaan 1–2 metrin korkeudelle lattiatasosta. Joissakin tapauksissa laitteet jouduttiin asentamaan korkeammalle, jotta ne eivät olisi huollettavien ulottuvilla. Koekohteiden ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden data saatiin lähimmältä Ilmatieteen laitoksen havaintoasemalta [6].

2.2 Mittausdatan analysointi

Kahden tutkimushankkeen mittausdata yhdistettiin ja yhdenmukaistettiin yhdeksi laajaksi otokseksi. Tutkitut tilat arvioitiin ja joukosta poistettiin ne, jotka eivät edustaneet koulujen ja päiväkotien opetushenkilökunnan tai huollettavien tyypillisesti käyttämiä tiloja. Tällaisia tiloja olivat esim. keittiöt, pesutilat ja varastotilat. Palvelutalot ja toimistorakennukset jätettiin myös pois otoksesta. Otos sisälsi lopulta 104 tutkittua tilaa 26 koneellisella ilmanvaihdolla varustetusta koulu- ja päiväkotikohteesta.

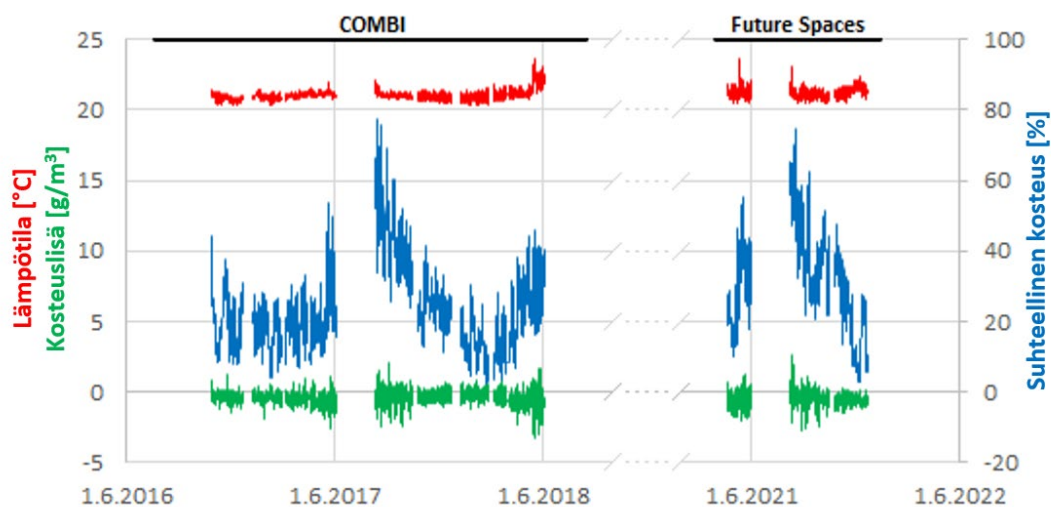
Käytönaikaista tarkastelua varten otoksesta poistettiin lomat ja arkipyhät. Lisäksi data jaettiin ulkoilman lämpötilan vuorokausikeskiarvon määrittämiin termiseen kesään ($T_e > 10\text{ °C}$) ja termiseen talveen ($T_e < 0\text{ °C}$) sekä eri käyttötilanteisiin, jotka kuvasivat eri käyttöasteen tilanteita arkipäivien sisällä.

Yhdistettyä dataotosta tarkasteltiin numeerisesti ja laskettiin tilastollisia tunnuslukuja kesä- ja talviolosuhteissa ja eri käyttötilanteissa. Käytönaikaista dataa tarkasteltiin vertailemalla mittauservoja eri lähteissä annettuihin luokitus- ja mitoitusarvoihin, jota on käsitelty tässä artikkelissa. Sisäilman lämpötila luokiteltiin Sisäilmastoluokitus 2018:ssa [7] esitetyn menetelmän mukaisesti. Lisäksi tehtiin erikseen ohjekortin mukainen luokitus kohdekohtaisesti. Lämpötiloja verrattiin myös asumisterveysasetuksen toimenpiderajoihin [10]. Suhteellisen kosteuden tarkastelussa käytönaikaista dataa vertailtiin standardissa EN ISO 13788 [8] annettuihin mitoitusarvoihin. Vertailukohtana käytettiin myös lähteessä [11] esitettyjä sisäilman suhteellisen kosteuden suositusarvoja, jotka ovat talvella 25–45 % RH ja kesällä 30–60 % RH.

Sisäilman kosteuslisä laskettiin mitattujen sisä- ja ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella laskettujen vesihöyrypitoisuuksien erotuksena. Käytönaikaisesta datasta laskettiin yksittäisten kalenteriviikkojen keskiarvot sekä kosteuslisälle että ulkoilman lämpötilalle. Kosteuslisän arvoille käytettiin kalenteriviikkojen keskiarvoja, jotta tulokset olisivat paremmin vertailukelpoisia aiempien tutkimusten [3–4] tuloksiin. Tulevaisuudessa myös tarkemman aikaresoluution tarkastelua tulisi tehdä. Kosteuslisän osalta tuloksia vertailtiin ohjeen RIL 107-2022 [9] mitoitusarvoihin, jotka ovat kosteusluokalle yksi (KL 1): $+3\text{ g/m}^3$ talvella ($T_e \leq +5\text{ °C}$) ja $+1\text{ g/m}^3$ kesällä ($T_e \geq +15\text{ °C}$).

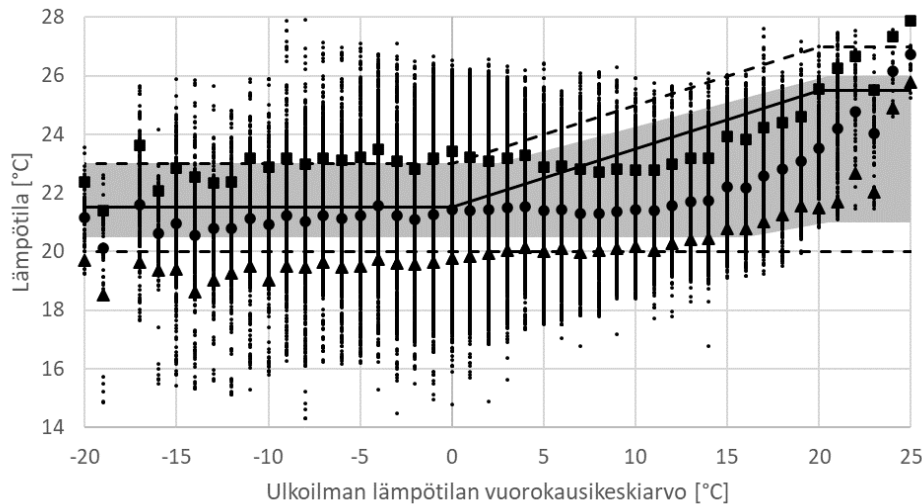
3. Tulokset

Kuvassa 1 on esitetty erään molemmissa tutkimushankkeissa mukana olleen koekohteen tilassa mitatut sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaustulokset sekä laskettu kosteuslisä ulkoilmaan nähden. Kuvassa esitetty data edustaa tyypillistä tapausta kahden kenttätutkimushankkeen henkilökunnan ja huollettavien käyttämien tilojen yhdistetystä otoksesta. Sisäilman lämpötila oli yleisesti vakaa ääriolosuhteet pois lukien.



Kuva 1. Eräässä tutkitussa tilassa COMBI- ja Future Spaces -tutkimushankkeiden aikana mitatut sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Datasta on poistettu lomat ja arkipyhät.

Kuvassa 2 on visualisoitu koko tulosaineiston käytönaikaiset lämpötilat suhteessa Sisäilmastoluokitus 2018 luokan S2 tavoitearvoihin. Mitatut lämpötilat pysyivät keskimäärin luokan S2 tavoitearvojen sisällä, mutta myös tavoitearvojen ylityksiä esiintyi, eli talvikaudella lämpötilan laskua ja kesäkaudella lämpötilan nousua. Sisäilmastoluokituksen kannalta erityisesti talviolosuhteiden alitukset laskivat datan pysyvyyttä tavoitearvojen sisällä, minkä vuoksi 90 % pysyvyyden ehto ei täyttynyt ja kaikki kohteet kuuluivat lämpötilan osalta luokkaan S3.



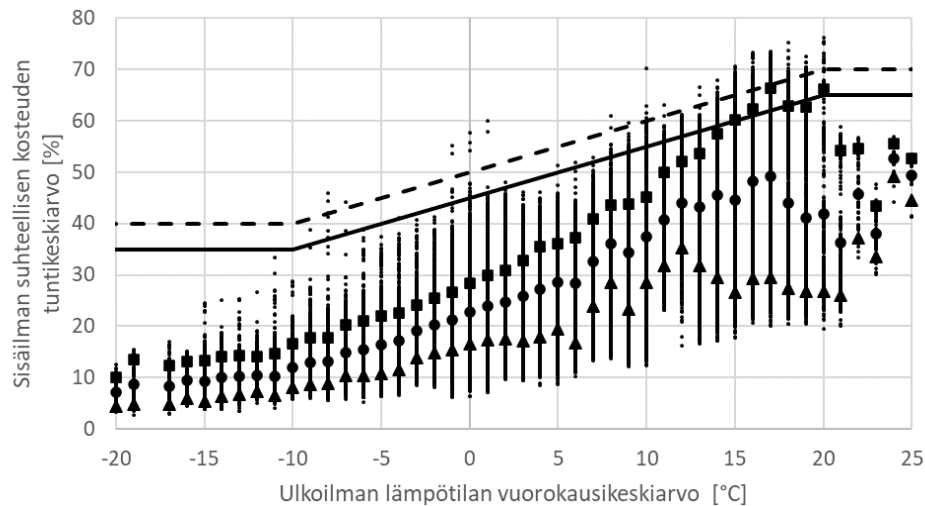
Kuva 2. Käytönaikaiset sisäilman lämpötilat verrattuna Sisäilmastoluokitus 2018 mukaisiin operatiivisen lämpötilan luokan S2 tavoitearvoihin. Kolmiot kuvaavat 10 % persentiilin, ympyrät keskiarvon ja neliöt 90 % persentiilin arvoja. Kuvaajassa on mukana kaikki mittausdata yhtenä datajoukkona.

Lämpimissä kesäolosuhteissa ($T_e \geq 20 \text{ °C}$) sisäilman lämpötilan S2-luokan tavoitearvojen ylitykset alkoivat kasvaa. Kuumimmista ulkoilman olosuhteissa ($T_e \geq 25 \text{ °C}$) S2-luokan mukainen sisäilman lämpötilan tavoitelämpötila ylittyi käytännössä kaikissa koekohteissa. Käytönaikainen data ei sisältänyt koulujen kesälomien aikaisilta hellejaksoilta kertynyttä mittausdataa. Termisen talven aikana havaittiin lämpötilan alituksia suhteessa asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen [10] antamaan 20 °C alarajaan ja käytönaikaisten olosuhteiden pysyvyyden arvojen sisällä oli 82 %.

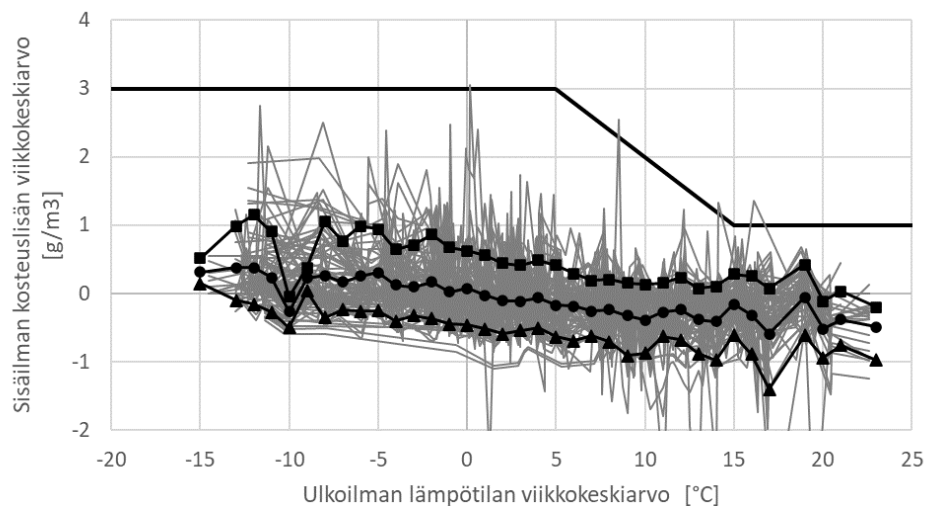
Kuvassa 3 on esitetty käytönaikaisen sisäilman suhteellisen kosteuden arvot ulkoilman lämpötilan funktiona verrattuna standardin SFS-EN ISO 13788 [8] mukaisiin mitoitusarvoihin. Datan numeerinen tarkastelun perusteella sisäilman suhteellisen kosteuden arvot pysyivät valtaosin (lähes 99 %) standardin SFS-EN ISO 13788 normaalin käyttöasteen mitoitusrajojen alapuolella. Termisen talven alueella suhteellinen kosteus pysyi kokonaisuudessaan rajojen alapuolella. Termisen kesän alueella korkean käyttöasteen raja-arvo kattaisi myös kesän aikaiset suhteellisen kosteuden arvot.

Suhteellisen kosteuden arvoissa oli merkittävä ero vuodenaikojen välillä ja siinä, miten suhteellinen kosteus pysyi lähteen [11] mukaisten suositusarvojen alueella. Termisen kesän aikana pysyvyys näiden arvojen sisällä oli noin 80 %, mutta talvella kuivan sisäilman pysyvyys näiden suositusarvojen sisällä oli hyvin heikko, myös 90 % persentiilin arvon jäädessä alle 25 % RH raja-arvon.

Kuvassa 4 on esitetty sisäilman kosteuslisän käytönaikaisen datan kalenteriviikoittaiset keskiarvot ulkolämpötilan funktiona verrattuna ohjeen RIL 107-2022 [9] mukaisiin raja-arvoihin.



Kuva 3. Käytönaikaiset sisäilman suhteellisen kosteuden arvot ulkolämpötilan funktiona verrattuna standardissa EN ISO 13788:2012 annettuihin normaalin käyttöasteen (kiinteä viiva) ja korkean käyttöasteen (katkoviiva) raja-arvoihin. Kolmiot kuvaavat 10 % persentiilin, ympyrät keskiarvon ja neliöt 90 % persentiilin arvoja.



Kuva 4. Sisäilman kosteuslisän kalenteriviikoittaiset keskiarvot ulkoilman lämpötilan funktiona verrattuna ohjeen RIL 107-2022 kosteusluokan 3 raja-arvoihin. Harmaat käyrät edustavat yksittäisiä tutkittuja tiloja. Kolmiot kuvaavat 10 % persentiilin, ympyrät keskiarvon ja neliöt 90 % persentiilin arvoja.

Käytönaikaisten tuntien viikoittaisten keskiarvojen visuaalinen tarkastelun perusteella kosteuslisän arvot pysyvät hyvin kosteusluokan 3 mitoitusarvojen alapuolella. Sisäilman vesihöyrypitoisuus on tasapainossa ulkoilman vesihöyrypitoisuuden kanssa painottuen keskimäärin hieman kosteusvajeen puolelle. Kosteusvajeen olosuhteiden suuri osuus ei vielä selvinnyt kohteiden, mittalaitteiden ja datan analysointimenetelmien tarkistuksista huolimatta.

4. Yhteenveto

Tämä artikkeli esitteli COMBI- ja Future Spaces -tutkimushankkeiden yhdistetyn kenttätutkimusdatan analyysituloksia koneellisella ilmanvaihdolla varustettujen koulujen ja päiväkotien sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteista henkilökunnan ja huollettavien käyttämissä tiloissa. Yhdistetyn ja yhtenäistetyn dataotoksen tarkastelu keskittyi käytönaikaisiin

olosuhteisiin, jolloin käyttäjät ovat läsnä. Sisäilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuslisän tuloksia tarkasteltiin ulkoilman lämpötilan funktiona. Sisäolosuhteiden tarkka tunteminen ja hallinta on tärkeää, koska näillä on olennaista vaikutusta sisäympäristön laatuun, rakennusten energiankulutukseen ja rakenteisiin kohdistuviin rakennusfysiikaalisiin rasituksiin.

Sisäilman lämpötila oli ulkoilman ääriolosuhteita lukuun ottamatta melko vakaa, mutta talvikauden aikaiset tavoitearvojen alitukset johtivat siihen, että kaikki rakennukset kuuluivat Sisäilmastoluokituksen 2018 osalta luokkaan S3. Sisäilman suhteellinen kosteus oli talvella hyvin matala, jonka vuoksi mittausarvojen pysyvyys kirjallisuudessa esitettyjen suositusarvojen sisällä oli hyvin heikkoa. Kuivan sisäilman pääteltiin johtuvan julkisten rakennusten tehokkaasta ilmanvaihdosta, joka on mitoitettu pitämään sisäilman epäpuhtauspitoisuudet kohtuullisella tasolla myös korkean käyttöasteen tilanteissa. Sisäilman kosteuslisän kannalta tehokas ilmanvaihto johtaa kuitenkin hyvin pieniin sisäilman kosteuslisän arvoihin. Kosteuslisän arvot tutkituissa koulu- ja päiväkotirakennuksissa pysyivät selvästi RIL 107-2022 kosteusluokan 3 mitoitusarvojen alapuolella.

Jatkotutkimusaiheita ovat esimerkiksi lämpötilojen käyttäytyminen ja hallinta kovien pakkas- ja hellekausien aikaan, kosteusvajeen syiden selvittäminen ja sisäilman kostutuksen vaikutukset.

Lähdeluettelo

- [1] ASHRAE. ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta, GA. 2017. Saatavilla: <https://www.ashrae.org> (viitattu 4.8.2023)
- [2] Rotronic. CO2 Display, CL11, CP11 – CO2 measuring instruments. Saatavilla: https://www.processsensing.com/docs/datasheet/datasheet_rotronic_co2-display.pdf viitattu 4.8.2023).
- [3] Vinha J. et al. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. 102 s. + 10 liites. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-2011041510587>
- [4] Vinha J. et al. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tutkimusraportti 140. 148 s. + 19 liites. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-2011122914971>
- [5] Comark. Test and measuring equipment – product catalogue. Saatavilla: <https://www.clarksonlab.com/vcCom.pdf> (viitattu 4.8.2023).
- [6] Ilmatieteen laitoksen Avoin data. Ilmatieteen laitos. 2023. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data> (viitattu 4.8.2023)
- [7] RT 07-11299. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS sr. 2019.
- [8] SFS-EN 13788 2001. 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [9] RIL107-2022 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 211 s.
- [10] Valvira (2016) Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 545/3025 soveltamisohje asunnon tai muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista ja ulkopuolisen asiantuntijan pätevyysvaatimuksista. Osa I, § 1–10. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto
- [11] Seppänen, O.; Seppänen, M. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Suomen LVI-liitto ry: Helsinki, 1996.

Päiväkotien ja koulujen koneellisen ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutus sisäilman olosuhteisiin ja laatuun

Tuomas Raunima, Joonas Ketko, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Future Spaces -hankkeessa tarkasteltiin ilmanvaihdon yöaikaisen kokonaan pysäyttämisen vaikutusta mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun 12 päiväkotitai koulukohteessa Pirkanmaalla. Tutkimuksessa vertailtiin alkutalven normaalitilanteen mittausjaksoa loppupalven muutetun tilanteen vertailujaksoon. Valitut peräkkäiset vertailujaksot olivat molemmat kestoltaan 11 viikkoa pitkiä ja niiden aikana ulkolämpötilojen keskiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutusta tarkasteltiin mittaamalla sisäilman fysikaalisia olosuhteita sekä kaasu- ja hiukkaspitoisuuksia. Vaikutusta arvioitiin vertailemalla vertailujaksoilla mitattuja vuorokauden tunnitaisia keskiarvoja. Ilmanvaihdon yöaikaisella pysäyttämällä ei käytännössä ollut vaikutusta sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin eikä hiilidioksidi- tai pienhiukkaspitoisuuksiin. TVOC- ja radonpitoisuudet kohosivat odotetusti yöllä ilmanvaihdon ollessa pysäytettynä, mutta käytönaikaisiin pitoisuuksiin tällä ei ollut merkittävää vaikutusta, mikäli ilmanvaihto käynnistettiin uudelleen 2–3 tuntia ennen rakennuksen ensimmäisten käyttäjien kuten siivoojien ja keittiöhenkilökunnan saapumista puhtaan sisäilman takaamiseksi. Sisäilman laadun käytönaikaiset muutokset eivät siten ole esteenä ilmanvaihdon pysäyttämälle poissaoloaikoina.

1. Johdanto

Koulujen ja päiväkotien sisäilmaongelmat ovat olleet pitkään merkittävä puheenaihe. Huonolla sisäympäristön laadulla on todettu olevan suurempi vaikutus lapsiin kuin aikuisiin. Tämän vuoksi päiväkotitai koulukäisten työympäristöön on kiinnitettävä tarkasti huomiota. [1] Suomen peruskouluissa opiskelee noin 500 000 oppilasta ja varhaiskasvatuksen piirissä on lapsia noin 200 000. Tämän lisäksi Suomessa julkisella sektorilla työskentelee noin 30 % työikäisistä henkilöistä. [2] Puhtaalla ja raikkaalla sisäilmalla on positiivisia vaikutuksia ihmisten oppimiskykyyn, työkyvykkyyteen ja terveyteen. Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen selvityksen mukaan työikäiset ihmiset viettävät ajastaan noin 90 % sisätiloissa. Pienet lapset ja vanhuksat saattavat pysytellä sisätiloissa jopa tätä enemmän. [3]

COMBI-hankkeen kenttätutkimuksissa 2016–2018 havaittiin päiväkotien ja koulujen yöaikaisen ilmanvaihdon aiheuttavan tutkituissa rakennuksissa alipaineisuutta ulkovaipan yli. [4] Sisäilman alipaineisuus voi aiheuttaa erilaisten terveyshaittoja aiheuttavien kaasujen ja pienhiukkasten kulkeutumista sisäilmaan rakennuksen vaipparakenteista tai ryömintätilasta. Sisäilman ylipaineisuus puolestaan voi aiheuttaa kosteuden pistemäistä kondensoitumista vaipparakenteisiin ilmavuotokohdissa ja siten synnyttää mikrobi- ja kosteusvaurioita. Future Spaces -hankkeen kenttätutkimuksissa 2021–2022 tutkittiin yöaikaisten alipaineisuuksien eliminoimisen vaikutusta sisäilman laatuun pysäyttämällä yöaikainen ilmanvaihto kokonaan likaisten tilojen erillispoistot mukaan lukien. Ilmanvaihdon yöllisen pysäyttämisen vaikutusta rakennusten sisäilman laatuun arvioitiin kahden vertailukelpoisen mittausjakson perusteella. Tutkituissa tiloissa mitattiin sisäilman fysikaalisia olosuhteita sekä epäpuhtauspitoisuuksia ja ilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutusta arvioitiin näiden vertailujaksokohtaisten mittaustulosten muutosten perusteella.

2. Menetelmät

2.1 Kenttämittaukset

2.1.1 Koekohteet

Kenttätutkimuksen koekohteina oli 12 koulu- tai päiväkotirakennusta Pirkanmaan alueelta sekä yksi toimistorakennus Tampereella ja toinen Helsingissä. Ilmanvaihdon pysäytys jätettiin tekemättä kahdessa rakennuksessa ilmalämmityksen vuoksi. Ilmanvaihdon pysäyttämisen tarkastelussa mukana olleiden kohteiden tietoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Koekohteiden tietoja.

Käyttö	Sijainti	Rak.vuosi	Runkomateriaali	IV-koneet	q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]
Toimisto	Tampere	1971	Puuranka	2 kpl	3,1
Päiväkoti	Tampere	2019	Betoni	4 kpl	0,9
Päiväkoti	Tampere	1986	Betoni	3 kpl	2,7
Päiväkoti ja koulu	Tampere	2018	Betoni	5 kpl	0,9
Päiväkoti ja koulu	Tampere	2014	Betoni	5 kpl	1,0
Päiväkoti ja koulu	Kangasala	2014	Betoni	2 kpl	0,86
Päiväkoti	Tampere	1904	Puuranka	2 kpl	2,34
Koulu	Lempäälä	1952, 2006	Tiili/betoni	6 kpl	3,8
Päiväkoti ja koulu	Kangasala	2012	Betoni	2 kpl	0,8
Päiväkoti	Tampere	2012	Betoni	3 kpl	0,5
Koulu	Tampere	1964, 1990	Betoni	7 kpl	4,25
Päiväkoti ja koulu	Tampere	2013, 2019	Betoni	30 kpl	1,0

2.1.2 Mittalaitteet

Kenttämittauskohteissa mitattiin jatkuvatoimisilla mittalaitteilla sisäilmasta paine-eroa ulkovaipan yli, lämpötilaa, suhteellista kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta, TVOC-pitoisuutta, radonpitoisuutta ja pienhiukkaspitoisuuksia PM1, PM2.5 & PM10. Ulkoilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja pienhiukkaspitoisuuden dataa saatiin Ilmatieteen laitoksen lähimmältä havaintoasemalta [5] ja havaintoarvoja hyödynnettiin kosteuslisan laskemisessa sekä pienhiukkaspitoisuuksien tarkastelussa. Taulukossa 2 on esitetty niiden mittalaitteiden tietoja, joilla saatuja mittaustuloksia käsitellään tässä artikkelissa.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet ja niiden ilmoittamat yksiköt.

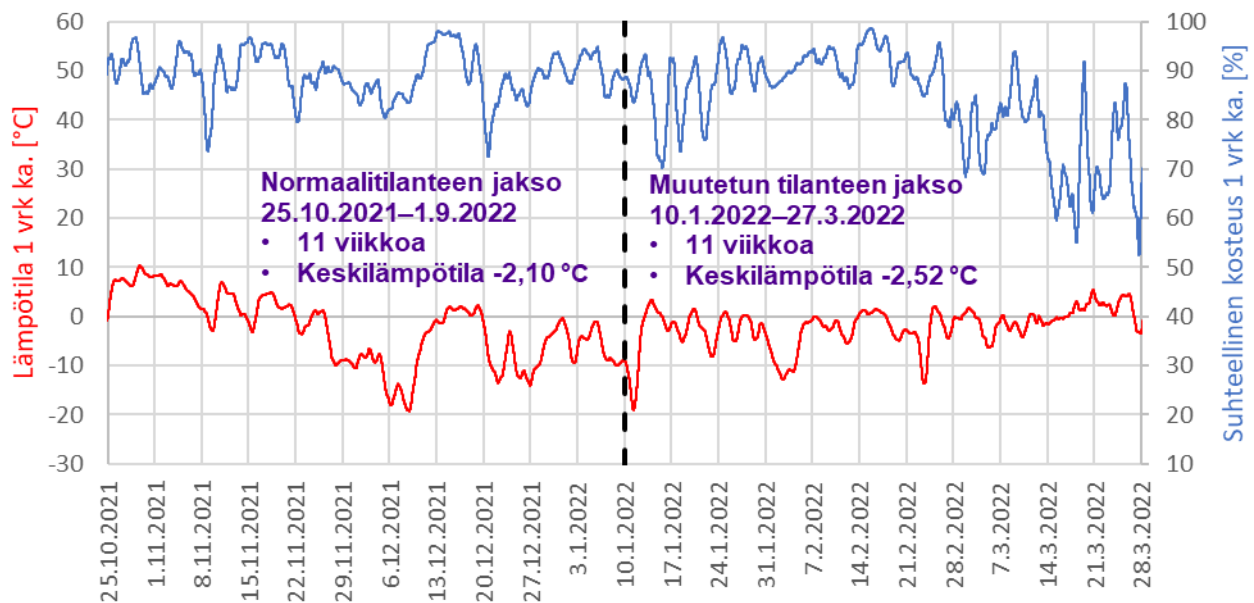
Suure	Mittalaite	Yksikkö
Lämpötila	Rotronic CL11	°C
Suhteellinen kosteus	Rotronic CL11	%
Hiilidioksidipitoisuus	Rotronic CL11	PPM (parts per million)
TVOC-pitoisuus	AirWits IAQ R1.1	PPB (parts per billion)
Radonpitoisuus	RadonEye Plus2	Bq/m ³
Hiukkaset PM1, PM2.5 & PM10	AirWits PM	µg/m ³

2.2 Ilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutus sisäilman olosuhteisiin ja laatuun

2.2.1 Normaalitilanteen ja muutetun tilanteen vertailujaksot

Ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutusta sisäilman laatuun arvioitiin kahden peräkkäisen vertailukelpoisen mittausjakson perusteella. Vertailujaksot ajoittuivat talvikaudelle ja jaksojen pituus ja ulkoilman keskiarvoiset olosuhteet pyrittiin valitsemaan mahdollisimman

vertailukelpoisiksi. Rakennusten sisäilman olosuhteet normaalitilanteessa määritettiin 25.10.2021–9.1.2022 tehtyjen mittausten perusteella. Yöilmanvaihto pysäytettiin 10.1.2022–28.3.2022. Vertailujaksojen pituus oli 11 viikkoa ja ulkoilman lämpötilat olivat lähellä toisiaan. Vertailujaksojen aikaiset ulkoilman olosuhteet on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Vertailujaksojen aikana vallinneet ulkoilman olosuhteet.

2.2.2 Data-analyysi

Mittalaitteilta noudettiin data kuukausittain. Tutkittuja tiloja oli kenttämittauksissa yhteensä 52 kpl ja mitattavia suureita jatkuvatoimisissa mittauksissa yhteensä 9 kpl. Mittausdataa kertyi siis paljon ja suuren datamäärän hallitsemiseksi raakadataa käsiteltiin ja koottiin Python-koodin avulla. Käsiteltyä dataa jatkokäsiteltiin Excel-taulukoilla ja Python-koodeilla. Merkittävimpänä työkaluna yöilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutuksen arvioimisessa käytettiin jana-laatikkuvaajaa, jolla vertailtiin yksittäisten tuntien keskiarvoja vertailujaksojen aikana. Vuorokauden tuntien keskiarvoja tarkastelemalla voitiin havaita yöaikaisten pitoisuuksien nousua ja laskua takaisin normaalitasolle ilmanvaihdon käynnistyttyä uudelleen.

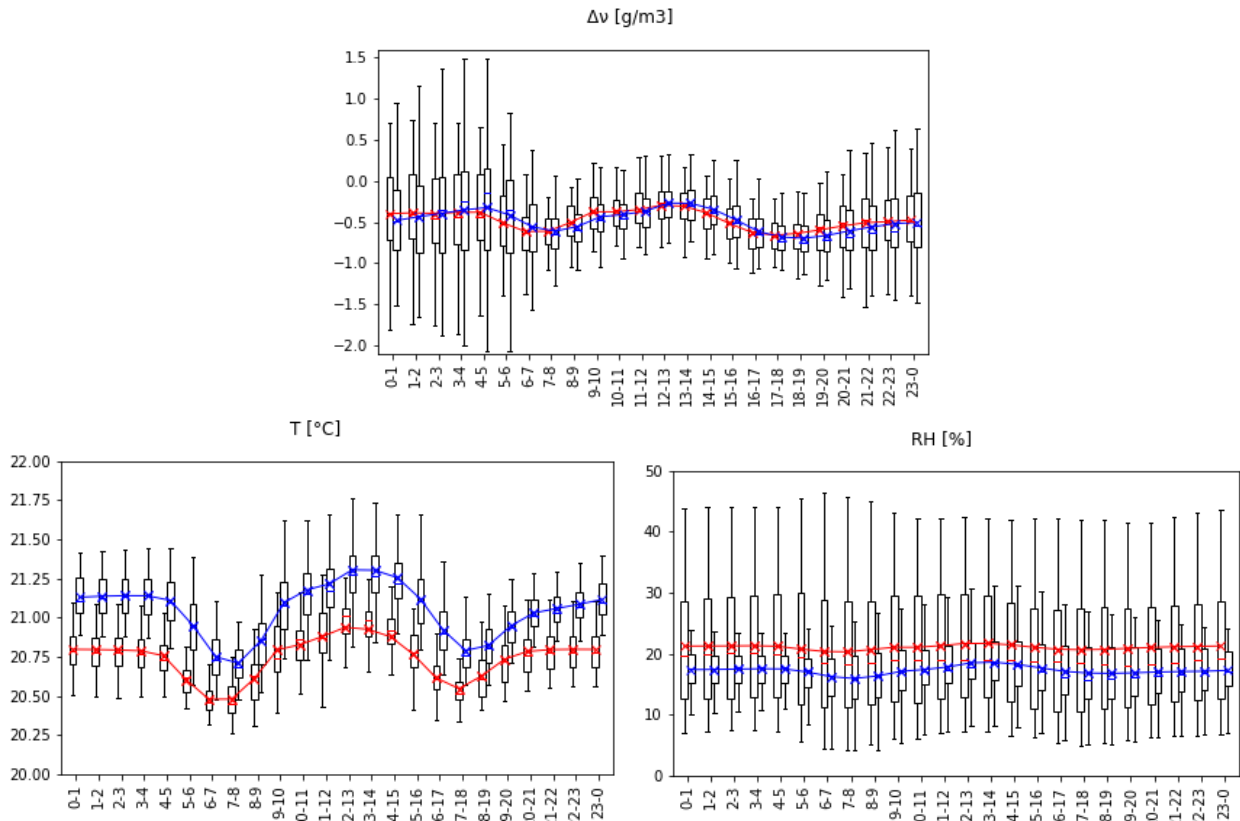
3. Tulokset

3.1 Ilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutus sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin

Ilmanvaihdon yöllisen pysäyttämisen vaikutusta sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin tutkittiin ja tulokset julkaistaan osana kansainvälistä vertaisarvioitua lehtiartikkelia [6]. Ilmanvaihdon pysäyttämällä ei ollut merkittävää vaikutusta rakennusten lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin. Sisäilman kosteuslisä (g/m^3) pysytteli molemmilla vertailujaksoilla hieman nollian alapuolella mukailien suhteellisen kosteuden vuorokausitrendiä. Tuntikohtaisten keskiarvojen erot vertailujaksojen välillä olivat olemattomat kosteuslisän arvojen ollessa lähes identtisiä. Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteiden osalta tuloksen on esitetty kuvassa 2.

Julkisten rakennusten ilmanvaihto on mitoitettu pitämään sisäilman epäpuhtauspitoisuudet kohtuullisella tasolla myös korkean käyttöasteen tilanteissa. Tämän seurauksena käyttäjäperäinen sisäilman ylimääräinen vesihöyrypitoisuus huuhtoutuu tehokkaasti päivän aikana, eikä rakennuksessa käytännössä ole sisäilman kosteuslähteitä poissaoloaikoina. Tämän vuoksi

yöilmanvaihdon pysäyttämisen ei vaikuta sisäilman kosteuslisään. Lämpötilan havaittiin olevan muutetussa tilanteessa koholla keskimäärin 0,3 °C. Ero voi johtua esimerkiksi keskitalvella tehostetusta lämmityksestä ilmanvaihdon pysäytysjaksolla. Hieman kohonnut lämpötila muutetussa tilanteessa näkyy vastaavasti suhteellisen kosteuden tuloksissa, jotka ovat muutetussa tilanteessa keskimäärin 3,8 % RH matalampia normaalitilanteeseen verrattuna. Ero voisi sen suuruusluokasta päätellen selittyä juuri edellä mainitulla lämpötilaerolla.



Kuva 2. Ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutus sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteiden tunnitaisiin keskiarvoihin. Muutetun tilanteen tuntien keskiarvot yhdistävä viiva on normaalitilanteen vastaavaan viivaan verrattuna T [°C] -kuvaajassa ylempänä ja RH [%] -kuvaajassa alempana.

3.2 Ilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutus sisäilman kaasu- ja pienhiukkaspitoisuuksiin

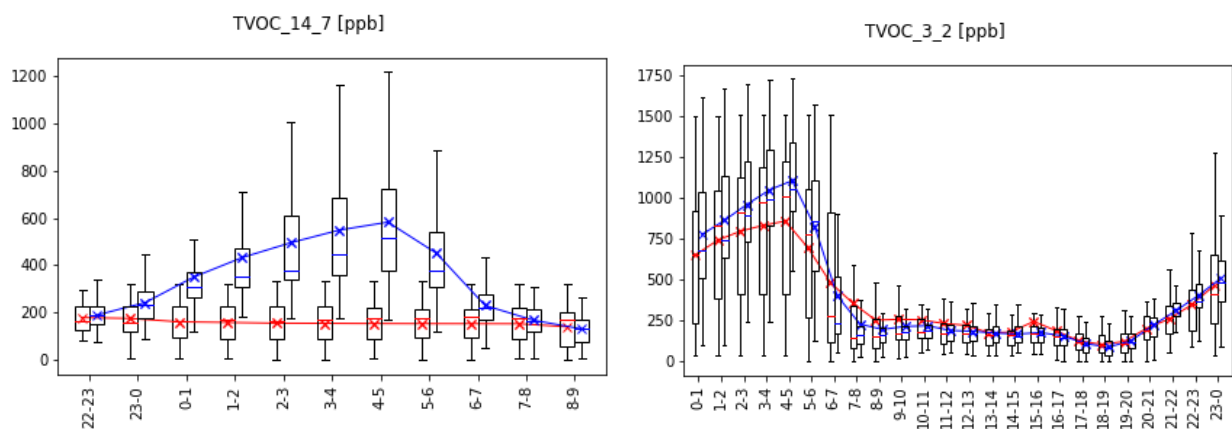
Ilmanvaihdon yöllisen pysäyttämisen vaikutusta sisäilman kaasu- ja pienhiukkaspitoisuuksiin tutkittiin diplomityössä. Tutkimuksessa mukana olleet tilat ryhmiteltiin ilmanvaihdon normaalitilanteen käyttötapausten perusteella. Suurimmat eroavaisuudet TVOC- ja radonpitoisuuksissa normaalin ja muutetun ilmanvaihdon vertailujaksojen välillä havaittiin niissä tiloissa, joissa oli normaalitilanteessa öisin tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä osateholla (KT1b), jolloin pitoisuudet pysyivät tasaisina ja matalina läpi yön. Muut öiset käyttötapaukset olivat tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä vain likaisissa tiloissa (KT1a) sekä kohteissa käytössä öisin vain poistoilmanvaihto (KT2). [7]

3.2.1 Sisäilman TVOC-pitoisuudet

Sisäilman VOC-lähteitä ovat rakennusmateriaalit, sisustusmateriaalit, tekstiilit, pesuaineet, kosmetiikka ja ihmiset. [8] Tiloissa on siten läsnä sisäilman VOC-lähteitä myös silloin, kun tilojen käyttäjät eivät ole paikalla. Ilmanvaihdon yöllisellä pysäyttämällä havaittiin olevan

suurin vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin niissä tutkituissa tiloissa, joissa oli normaalitilanteessa öisin tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä osateholla. Sisäilman TVOC-pitoisuuksien ero vertailujaksoilla on havainnollistettu kuvassa 3.

Yöaikaiset TVOC-pitoisuudet kohosivat odotetusti ilmanvaihdon ollessa pysäytettynä. Ero normaalitilanteeseen verrattuna on selvä erityisesti tiloissa, joissa oli normaalitilanteessa öisin tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä osateholla (Kuva 3, tila 14_7). Mittaustuloksista kuitenkin huomattiin, että ilmanvaihdon käynnistyessä klo 4:00 TVOC-pitoisuus kääntyy laskuun ja huuhtoutuu normaalitilanteen tasolle klo 7–8 mennessä. Tutkittujen tilojen käyttöajan alkaessa klo 8 tilanne oli normalisoitunut. Päivisin pitoisuuksiin vaikuttaa suuresti käyttäjät sekä heidän toimintansa, jolloin käyttötuntien aikaiset pitoisuudet voivat erota vertailujaksoilla. Mikäli tilojen käyttö oli vakiintunutta, normaalin ja muutetun ilmanvaihdon käyttötapauksien pitoisuudet käyttäytyivät yhdenmukaisesti käyttötuntien aikana (Kuva 3, tila 3_2). Kuvasta 3 voidaan myös havaita yöaikaisten pitoisuuksien käyttäytymistä käyttötapauksessa KT1a (tila 3_2).



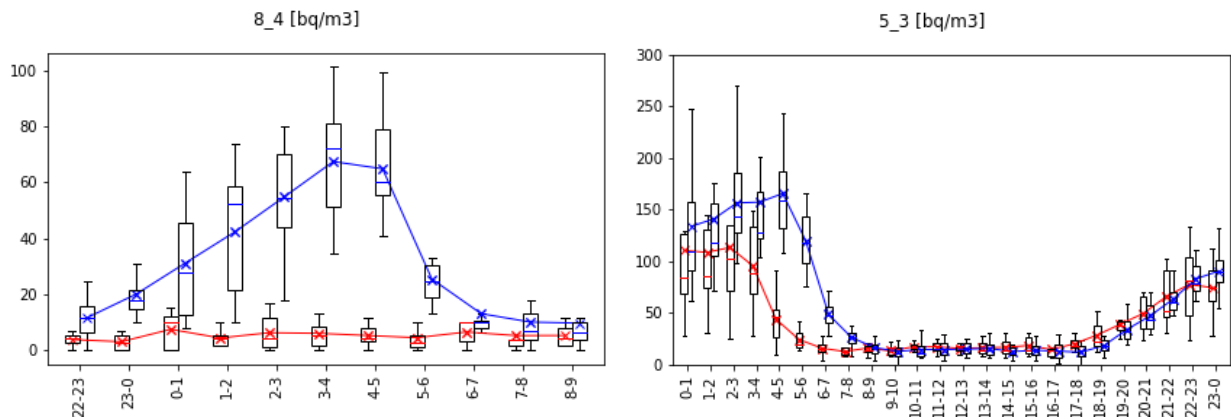
Kuva 3. Käyttötapauksen KT1b tilassa 14_7 mitattujen TVOC-pitoisuuksien yöaikaisten tuntien keskiarvot ja vuorokauden tunnitaiset mitatut pitoisuuksien keskiarvot käyttötapauksen KT1a tilasta 3_2, jossa päiväaikainen käyttö oli vakiintunutta. Muutetun tilanteen tuntien keskiarvot yhdistävä viiva on normaalitilanteen vastaavaan viivaan verrattuna tilan 14_7 kuvaajassa ylempänä ja tilan 3_2 kuvaajassa yöaikaisten tuntien ajan ylempänä.

3.2.2 Sisäilman radonpitoisuudet

Sisäilman radonlähteenä on maaperä ja rakennuksen alustäyttö. [8] Radonpitoisuudet saattoivat vaihdella hyvin paljon käyttöajan ja yön välillä myös ilmanvaihdon normaalitilanteessa. Huippupitoisuuksiin vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihdon toteutus, rakennuksen perustamistapa, ilmavuodot, painesuhteet sekä rakennuksen alueellinen sijainti. Ilmanvaihdon yöllisellä pysäyttämällä havaittiin olevan myös radonpitoisuuksiin suurin vaikutus niissä tutkituissa tiloissa, joissa oli normaalitilanteessa öisin tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä osateholla. Sisäilman radonpitoisuuksien eroa vertailujaksoilla on havainnollistettu kuvassa 4.

Odotetusti myös yöaikaiset radonpitoisuudet kohosivat ilmanvaihdon ollessa pysäytettynä ja ero normaalitilanteeseen verrattuna on selvä erityisesti tiloissa, joissa oli normaalitilanteessa öisin tulo- ja poistoilmanvaihto käynnissä osateholla (Kuva 4, tila 8_4). Mittaustuloksista kuitenkin huomataan jälleen, että ilmanvaihdon käynnistyessä klo 4:00 myös radonpitoisuudet kääntyvät laskuun ja huuhtoutuvat normaalitilanteen tasolle käyttöajan alkuun mennessä. Tutkittujen tilojen käyttöajan alkaessa klo 8 tilanne oli normalisoitunut. Pitoisuudet käyttäytyivät arki öisin hyvin samankaltaisesti VOC-pitoisuuksiin verrattuna, vaikka päästölähde oli lähtökohtaisesti maaperä rakennuksen sisällä olevien rakennusmateriaalien ja kalusteiden sijaan. Radonmittauspurkeilla

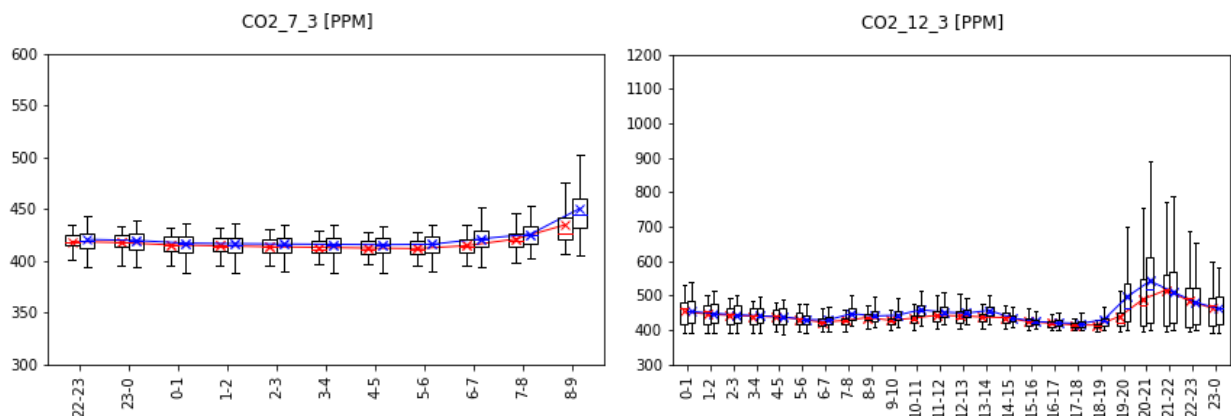
mitatut radonpitoisuudet olivat yleisesti matalia ja pysyivät selvästi alle toimenpiderajan 300 Bq/m³ ja Sisäilmastoluokituksen (2018) S1-tavoitearvon 100 Bq/m³.



Kuva 4. Käyttötapausten KT1b tilassa 8_4 mitattujen radonpitoisuuksien yöaikaisten tuntien keskiarvot ja vuorokauden tunnitaiset mitatut pitoisuuksien keskiarvot käyttötapausten KT1a tilasta 5_3. Muutetun tilanteen tuntien keskiarvot yhdistävä viiva on normaalitilanteen vastaavaan viivaan verrattuna tilan 8_4 kuvaajassa ylempänä ja tilan 5_3 kuvaajassa yöaikaisten tuntien ajan ylempänä.

3.2.3 Sisäilman hiilidioksidipitoisuudet

Sisäilman hiilidioksidilähteenä päiväkodeissa ja kouluissa ovat ihmiset, eli rakennusten käyttäjät. Tavanomainen syy kohonneille hiilidioksidipitoisuuksille on riittämätön ilmanvaihto suhteessa tilojen käyttöön. [8] Tyypillisesti koulu- ja päiväkotirakennuksissa, joissa ei ole iltaisin tai öisin toimintaa, hiilidioksidipitoisuudet lähentelevät öisin ulkoilman hiilidioksidipitoisuutta. Hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytyminen oli arki öisin hyvin samankaltaista kaikkien ilmanvaihdon käyttötapausten tiloissa. Sisäilman hiilidioksidipitoisuudet olivat hieman oletettua ulkoilman pitoisuutta (400 ppm) suuremmat. Hiilidioksidipitoisuuksien mittaustuloksia vertailujaksoilla on esitetty kuvassa 5.

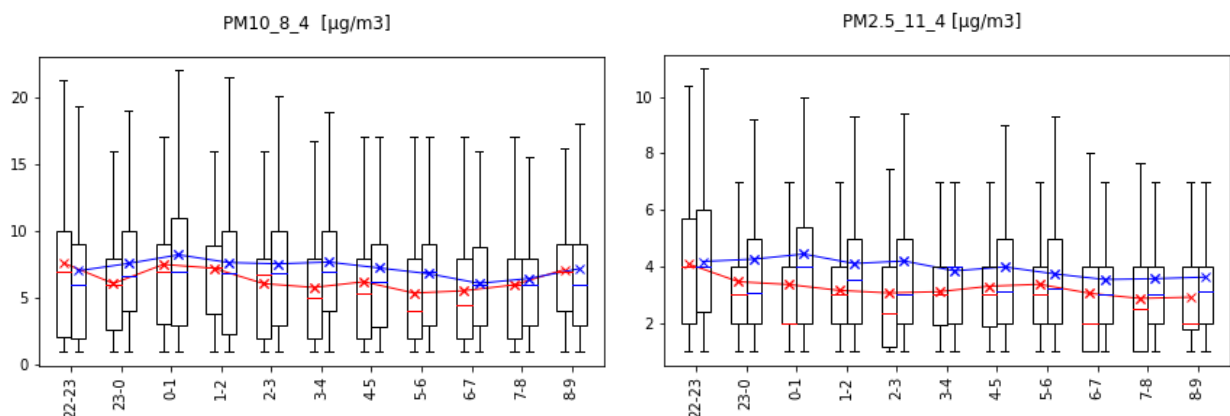


Kuva 5. Hiilidioksidipitoisuudet ovat molemmilla vertailujaksoilla samalla tasolla. Mittaustulokset yön tunneilta tilasta 7_3 ja koko vuorokauden ajalta tilasta 12_3. Muutetun tilanteen tuntien keskiarvot yhdistävä viiva ja normaalitilanteen vastaava viiva ovat molemmissa kuvaajissa lähes päällekkäin. Tilassa 12_3 illan tunteina havaittiin muutetussa tilanteessa normaalitilanteesta erottuva nousu, joka aiheutui tilan iltakäytöstä.

Kuvassa 5 esitettyjen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että ilmanvaihto pitää käytönaikaiset hiilidioksidipitoisuudet keskimäärin hyvällä tasolla. Rakennusten käyttäjien poistuttua rakennuksessa ei ole enää hiilidioksidilähteitä, ja ilmanvaihto huuhtelee sisäilmaan jääneen hiilidioksidipitoisuuden pois ennen ilmanvaihdon ajoitettua pysäyttämistä. Tämän vuoksi ilmanvaihdon öisellä pysäyttämällä ei ole vaikutusta sisäilman hiilidioksidipitoisuuksiin. Tilan 12_3 tuloksissa havaittava myöhäisillan aikaan normaalitilanteeseen verrattuna hieman kohonneita hiilidioksidipitoisuuksia, jotka laskivat tasaisesti yön aikana. Tilan kohonneet öiset hiilidioksidipitoisuudet selittää tilan käyttö iltaisin, joka nostaa mitattuja pitoisuusarvoja klo 22 asti.

3.2.4 Sisäilman pienhiukkaspitoisuudet

Sisäilman pienhiukkaslähteitä ovat ulkoilma (teollisuus, liikenne), tupakansavu, kopiokoneet, kosteusvauriot, pienpoltto, kynttilät ja tulisijat. Tunnettuja pienhiukkasten haittoja ja oireita ovat viihtyvyshaitat, sydän- ja hengityselinsairaudet ja astma. [8] Sisäilman hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat merkittävästi tilojen käyttö, kalusteet, ulkoilman hiukkaspitoisuus ja ilmansuodatus. Pienhiukkaspitoisuuksissa ei havaittu merkittävää muutosta käyttö- ja poissaolotuntien välillä ja pitoisuudet pysyivät viikkokohtaisella tarkastelulla lähes samalla tasolla kellonajasta riippumatta. Ilmanvaihdon muutetussa tilanteessa alkuvuonna 2022 ulkoilman hiukkaspitoisuudet olivat hieman suurempia kuin normaalitilanteessa loppuvuodesta 2021. Pienhiukkaspitoisuuksien mittaustuloksia vertailujaksoilla on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Pienhiukkaspitoisuudet PM10 tilasta 8_4 ja PM2.5 tilasta 11_4. Muutetun tilanteen tuntien keskiarvot yhdistävä viiva on normaalitilanteen vastaavaan viivaan verrattuna molemmissa tiloissa hieman ylempänä.

Ilmanvaihdon yöllisellä pysäyttämällä ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta sisäilman pienhiukkaspitoisuuksiin. Ilmanvaihdon muutetussa tilanteessa sisäilman pienhiukkaspitoisuudet olivat hieman koholla normaalitilanteeseen verrattuna. Ero tunnittaisissa pitoisuuksissa oli kuitenkin pienempää kuin $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ero selittyy todennäköisesti sillä, että ulkoilman pienhiukkaspitoisuus oli muutetun tilanteen aikana koholla normaalitilanteeseen nähden. Muutetun ilmanvaihdon tilanteessa ulkoilman pienhiukkasia on mahdollisesti kulkeutunut enemmän sisäilmaan mm. ulko-ovien ja ilmanvaihdon kautta. Tarkastelujaksojen välillä sisäilman pienhiukkaspitoisuudet eivät toisaalta nousseet suhteessa yhtä paljon kuin ulkoilman pienhiukkaspitoisuudet. Tästä päätellen kohteiden ilmanvaihtokoneiden suodattimet pitävät sisäilman pienhiukkaspitoisuudet matalina ulkoilman pienhiukkaspitoisuuksien kasvusta huolimatta.

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon yöaikainen pysäyttäminen vaikuttaa päiväkotien ja koulujen sisäilman olosuhteisiin ja laatuun. Tutkimustulosten perusteella yöaikaisen ilmanvaihdon pysäyttämisellä ei ole vaikutusta käytönaikaiseen sisäilman laatuun, kun ilmanvaihto pysäytetään illalla noin kaksi tuntia käyttäjien poistuttua rakennuksesta ja käynnistetään uudelleen 2–3 tuntia ennen käyttöajan alkamista, jotta ilmanvaihto ehtii huuhtoa sisäilman ennen ensimmäisten käyttäjien saapumista hyvän sisäilman laadun takaamiseksi. Kaikkia rakennuksia tulee kuitenkin käsitellä yksilöinä ja sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien palautuminen normaalitasolle ennen käyttöajan alkamista tulee varmistaa mittauksin. Menetelmää toteuttaessa tulee lisäksi huomioida rakennuskohtaisten ilmanvaihtojärjestelmien toimintaan liittyvät haasteet. Kaikki ilmanvaihto tulee kytkeä toimimaan automaatiojärjestelmän kautta, mikä voi olla haasteellista erityisesti vanhemmissa rakennuksissa, joissa on alkeellisempi ilmanvaihtojärjestelmä. Yksittäinen päälle jäävä poistokone voi aiheuttaa rakennukseen merkittävää alipaineisuutta muiden ilmanvaihtokoneiden pysähtyessä. Oikein toteutettuna julkisten rakennusten poissaolonaikaisella ilmanvaihdon pysäyttämisellä voidaan säästää ilmanvaihdon lämmitykseen kuluva energiaa.

Lähdeluettelo

- [1] Toyinbo, O., Shaughnessy, R., Turunen, M., Putus, T., Metsämuuronen, J., Kurnitski, J. & Haverinen-Shaughnessy, U. 2016. Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools. *Building and environment*, 104, pp. 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.030>
- [2] Lestinen, S., Kilpeläinen, S. & Kosonen, R. 2021. Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0414-1>
- [3] THL. 2022. Sisäilma. Www-sivu. Saatavilla (viitattu 3.10.2023): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma>
- [4] Kauppinen A. 2018. Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201811292781>
- [5] Ilmatieteen laitoksen Avoin data. Ilmatieteen laitos. 2023. Saatavilla (viitattu 3.10.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>
- [6] Raunima T, Laukkarinen A, Kauppinen A, Kiviste M, Tuominen E, Ketko J & Vinha J. Indoor air temperature and relative humidity measurements in Finnish schools and day-care centres. (Artikkelin käsikirjoitus arvioitavana)
- [7] Ketko, J. 2023. Yöaikaisen ilmanvaihdon sammuttamisen vaikutukset koulujen ja päiväkotien kaasu- ja hiukkaspitoisuuksiin. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Tampere. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202305135729>
- [8] Pitkäranta M. (toim.). 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö. Helsinki. Saatavilla (viitattu 3.10.2023): <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75517>

Ilmanvaihdon käyttöajan ulkopuolisen pysäyttämisen vaikutukset koettuun sisäilmastoon käyttöaikana kouluissa ja päiväkodeissa

Pentti Kuurola¹, Tuomas Raunima², Joonas Ketko², Oluyemi Toyinbo¹, Juha Vinha² ja Ulla Haverinen-Shaughnessy¹

¹ Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

² Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Rakennusten ilmanvaihdolla on merkittävä rooli sisäilman laadun, terveellisyyden ja viihtyvyyden sekä energiankulutuksen kannalta. Julkisuudessa on esitetty epäilyjä, että ilmanvaihdon sammuttaminen kokonaan voi johtaa huonoon sisäilman laatuun sekä kosteus- ja homevaurioihin. Yleinen käytäntö on ollut pitää ilmanvaihto osittain käynnissä yöaikana käyttämällä esimerkiksi ns. erillispoistoja. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, vaikuttaako ilmanvaihdon yöaikainen pysäyttäminen päiväkotien ja koulurakennuksissa mitattuun sekä lapsien ja henkilökunnan kokemaan sisäilman laatuun ja oireisiin. Kahdessa koulun ja päiväkotirakennuksessa tehtiin laajoja kenttämittauksia sekä standardoituja kyselytutkimuksia koulujen henkilökunnalle ja oppilaille ennen ja jälkeen ilmanvaihdon toimintatavan muutosta. Ilmanvaihto oli tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa päällä ympäri vuorokauden automaatiojärjestelmän ohjaamana. Toisessa vaiheessa ilmanvaihto pysäytettiin täysin yöksi varsinaisen käyttöajan ulkopuolella, kytkien se päälle kahdeksi tunniksi ennen käyttöjaksoa ja käyttöjakson jälkeen. Tulosten mukaan koulujen ja päiväkotien ilmanvaihdon sammuttamisella yöllä ei ollut merkitseviä vaikutuksia mitattuun tai koettuun sisäilmastoon tutkimuskohteiden henkilökunnan tai oppilaiden keskuudessa.

1. Johdanto

Suomessa on keskusteltu ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutuksista sisäilman laatuun ja epäilty sen aiheuttavan ongelmia mm. kosteus- ja mikrobitasoihin ja mikrobitasoihin rakenteissa. Yleinen käytäntö on ollut pitää päällä joko koko rakennuksen ilmanvaihtolaitteistoa minimi-ilmavirralla tai pelkästään ns. liikaisten tilojen poistoilmanvaihtoa. Aikaisemmassa tutkimuksessa havaittiin, että koneellinen ilmanvaihto voi aiheuttaa korkean alipaineen rakennuksen vaipan yli yöaikana toimiessaan osateholla [1]. Korkea alipaine voi imeä epäpuhtauksia mm. rakenteista, kun taas korkea ylipaine voi johtaa paikalliseen pistemäiseen kosteuden tiivistymiseen ilmavuotokohdissa, mikä lisää mikrobikasvun riskiä [2]. Korkea alipaine on yhdistetty myös rakennusten käyttäjien raportoimaan korkeampaan tyytymättömyyteen sisäilman laadun suhteen [3]. Toisaalta sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien odotetaan nousevan, kun ilmanvaihto ei ole käynnissä. Pitoisuudet laskevat kuitenkin tavoitetasoon, kun ilmanvaihto kytetään päälle [4].

Erilaisten sisäilmastotekijöiden asianmukainen hallinta oppilaitoksissa ja päiväkodeissa on tärkeää, koska huonolla sisäilman laadulla voi olla haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen, hyvinvointiin ja suorituskykyyn [5–7]. Koulujen ja päiväkotien sisäilman laadun merkitystä korostaa entisestään se, että koululaiset viettävät huomattavan paljon aikaa näissä ympäristöissä. Lisäksi sisäilman laatu voi vaikuttaa myös koulun opettajien ja muun henkilöstön terveyteen ja tuottavuuteen [8]. Lestinen et al. [9] vertaili suomalaisessa koulututkimuksessa kolmea ilmanvaihtostrategiaa: 1) jatkuva ilmanvaihto, 2) jaksottainen ilmanvaihto ja 3) täydellinen sammutus käyttöjakson ulkopuolella, lukuun ottamatta kahta tuntia ennen käyttöjaksoa. He

päätelivät, että kahden tunnin ilmanvaihto ennen käyttöjaksoa on riittävä varmistamaan hyväksyttävä sisäilman laatu, kun taas ilmanvaihto käyttöjakson ulkopuolella on melko tarpeetonta [9]. Tutkimuksessa sisäilman laadun arviointi perustui vain haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärän (TVOC) ja laskeutuneen pölyn mikrobipitoisuuksiin. Lisäksi voidaan sanoa, että kouluissa ja hoitolaitoksissa energiansäästön tulisi olla toissijainen arvo oppimisen, terveyden ja hyvinvoinnin lisäksi [10], mitä Lestinen et al. [9] ei tutkimuksessaan suoranaisesti tarkastellut.

Koulut ja päiväkodit ovat tyypillisesti käytössä arkisin noin 6–8 tuntia, lukuvuoden ollessa keskimäärin 190 päivää. Rakennukset ovat tyhjiällä öisin, viikonloppuisin sekä loma-aikoina. Käyttöaste on tällöin noin 53 % vuoden päivistä, mutta vain 17 % verrattuna vuoden tuntimäärään. Koneellisen ilmanvaihdon energiankulutuksen osuudeksi on arvioitu noin 30 % rakennusten kokonaisenergiankulutuksesta [11], joten ilmanvaihdon sammuttaminen käyttöjaksojen ulkopuolella voi vähentää energiankulutusta merkittävästi [12].

2. Tutkimuksen toteuttaminen

Tutkimus tehtiin osana Future Spaces -tutkimushanketta, jonka tavoitteena on parantaa sisäilman laatua palvelu- ja liikerakennuksissa. Tässä artikkelissa keskitymme vertaamaan mitatun ja oppilaiden sekä henkilökunnan raportoiman sisäilman laadun eroja kahden ilmanvaihdon toimintatilan välillä. Vaiheessa 1 tutkimusrakennusten ilmanvaihtojärjestelmiä käytettiin täydellä ilmamäärällä keskimäärin klo 4–17 välillä. Ilmanvaihto toimi alennetulla ilmavirralla läpi yön mm. erillispoistojen ollessa toiminnassa. Vaiheessa 2 ilmanvaihto suljettiin käyttöajan ulkopuolella. Ilmanvaihto kytkettiin käyntiin kaksi tuntia ennen käyttöjaksoa, jolloin ilmanvaihto toimi täydellä ilmamäärällä keskimäärin klo 5–17. Joissain tapauksissa ilmanvaihto jäi rakennuksen iltakäytön tai muiden vaatimusten vuoksi päälle myöhempään, joko täydellä tai osittaisella ilmavirralla. Tarkempia tietoja kohteista, tutkimusasetelmasta, tehdyistä mittauksista ja muista havainnoista on raportoitu Joonas Ketkon diplomityössä [13].

Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmä toteutti hankkeen puitteissa laajat kenttämittaukset kahdessatoista koulu- ja päiväkotirakennuksessa. Kohteissa ei ole tiedossa mitään sisäilman laatuun vaikuttavia muita tekijöitä, jotka olisivat estäneet ilmanvaihdon jaksottaisen käytön kohteissa. Mittaukset ja kyselyt suoritettiin kahdessa vaiheessa: 1) normaali toimintatila loka - joulukuussa 2021 ja 2) ilmanvaihto sammutettuna yöaikana tammi - maaliskuussa 2022. Kohteissa mitattiin paine-eroja vaipan yli (ΔP), lämpötilaa (T), kosteutta (RH), sisäilman pienhiukkasia ($PM_{2,5}$ ja PM_{10}), hiilidioksidia (CO_2) ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) pitoisuuksia.

Tutkimuksessa kerättiin tietoja Örebro MM kyselyillä, joka on työpaikoille kehitetty yleisesti käytetty, standardoitu menetelmä [14]. Kyselyä on kehitetty ja siitä on luotu erilaisia versioita eri ympäristöihin, kuten kouluihin ja päiväkoteihin. Käytimme tutkimuksessa MM40-kyselyä henkilökunnalle ja MM80-kyselyä 0–6-vuotiaiden lasten vanhemmille. Kyselyt toteutettiin kolmen kuukauden muistijakson mukaisesti joulukuussa 2021 ja maaliskuussa 2022. Tutkimuskohteiden henkilökuntaa ja oppilaiden vanhempia pyydettiin vastaamaan verkkokyselyihin, jotka oli laadittu LimeSurveyCommunity Edition versiolla 5.6.1. Kyselyvastaukset analysoitiin Örebro-mallin mukaisesti käyttäen lisäksi tilastollisissa tarkasteluissa IBM SPSS-ohjelmistoa (versio 26).

3. Tulokset

3.1 Mittaustulokset

Keskimääräiset ulkoilman olosuhteet olivat T -2,1°C ja RH 88 % vaiheessa 1 ja T -2,5°C ja RH 84 % vaiheessa 2. Ennen ilmanvaihdon toimintatavan muutosta ja muutoksen jälkeen havaittiin tilastollisesti merkittäviä eroja keskimääräisessä sisäilman lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa (taulukko 3). Teoriassa eroja voisi selittää ilmanvaihdon vähentyminen käyttöjakson ulkopuolella ilman lämmitysjärjestelmän säätöä, mikä voisi johtaa korkeampaan sisäilman lämpötilaan ja siten alhaisempaan ilman suhteelliseen kosteuteen talvella. Toisaalta erot voivat myös liittyä hieman erilaisiin ulko-olosuhteisiin toteutetuilla mittausjaksoilla. Myös hiukkaspitoisuuksien välillä havaittiin tilastollisesti merkitseviä eroja, mutta mitatut pitoisuudet olivat kaikkienensa hyvin alhaisia, jolloin niillä ei ole käytännön merkitystä.

Taulukko 1. Keskimääräiset arviot sisäilman laadun parametreille käyttötuntien aikana (klo 9–15) ennen ilmanvaihdon muutosta ja muutoksen jälkeen.

Sisäilman laadun parametri	Estimaatti		
	Vaihe 1	Vaihe 2	p-arvo
keskim. ΔP [Pa]	-9.3	-8.0	0.301
keskim. lämpötila [°C]	20.9	21.3	0.038
keskim. suhteellinen kosteus [%]	21.4	18.2	0.000
max. CO ₂ pitoisuus [ppm]	838.9	917.0	0.107
max. VOC pitoisuus [ppb]	2984.6	3004.8	0.753
keskim. PM _{2.5} pitoisuus [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.8	4.4	0.000
keskim. PM ₁₀ pitoisuus [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	5.9	6.5	0.007

3.2 Kyselyiden tulokset

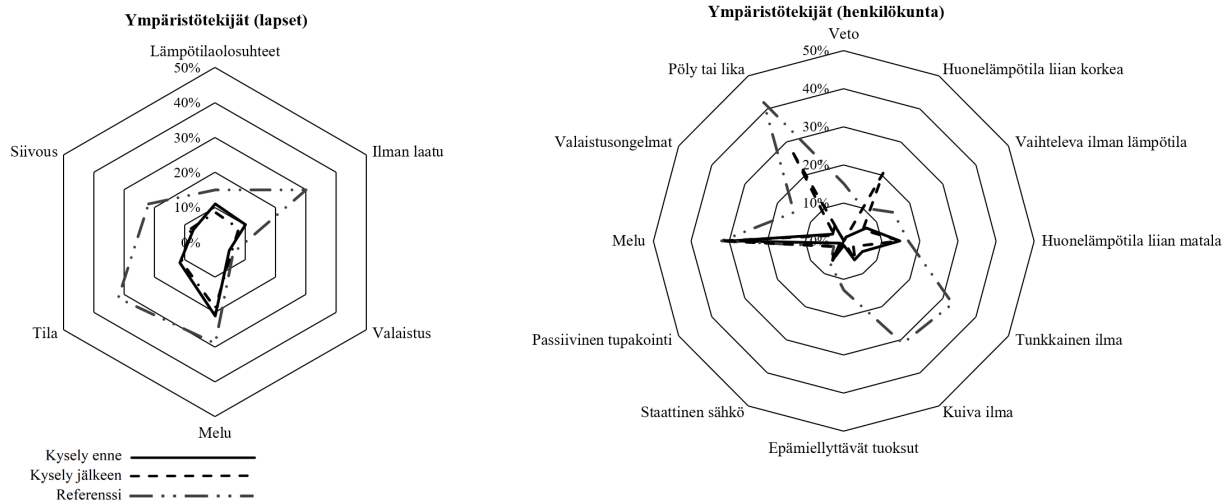
Kysely lähetettiin 859 vanhemmalle ja 119 henkilökunnan jäsenelle. Henkilöstön kokonaisvastausprosentti oli 42 % (vaihdellen koulukohtaisesti 7–83 %:n välillä) ja vanhempien 19 % (vaihdellen koulukohtaisesti 1–35 %:n välillä). Ensimmäiseen kyselyyn vastanneista 50 henkilöstön jäsenestä 46 vastasi toiseen kyselyyn ja vastaavasti lasten osalta vastaajia oli 139 ja 63. Taulukossa 4 esitetään vastaajien taustatiedot ensimmäisen (ennen muutosta, vaihe 1) ja toisen muutoksen (vaihe 2) jälkeen kyselyn perusteella. Ihottumaa (ekseemaa) raportoivien lasten osuus oli merkitsevästi alhaisempi toisessa kyselyssä, mikä voi vaikuttaa havaittuihin yhteyksiin sisäilman laadun ja oireiden välillä. Henkilökunnan keskuudessa havaittiin merkitseviä eroja eri kyselykertojen välillä psykososiaalisissa tekijöissä.

Taulukko 2. Kyselyvastaajien taustatiedot ja vastausprosentti [%].

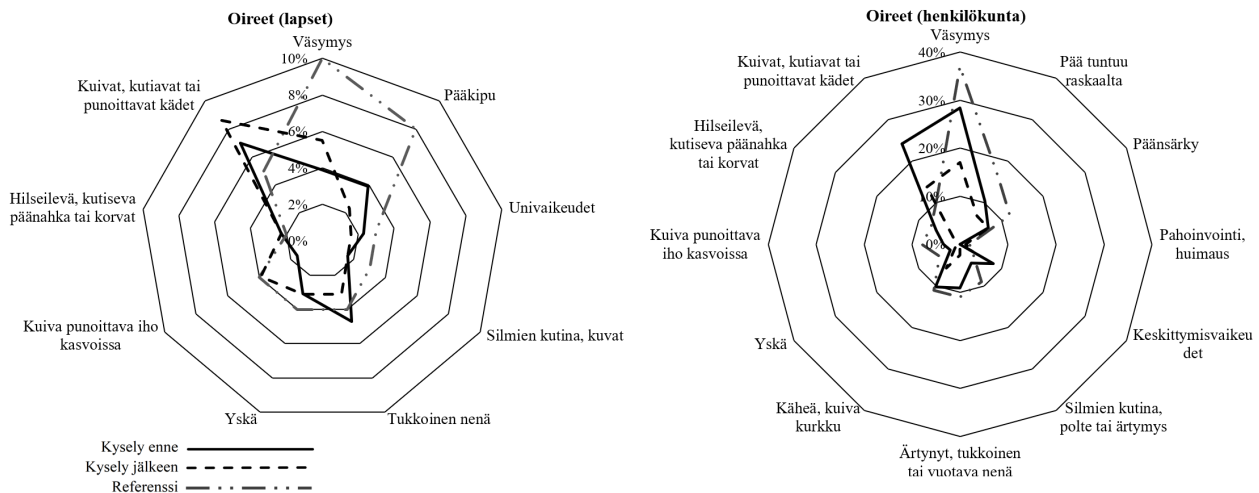
Kysely	Lapset			Henkilökunta		
	Vaihe 1	Vaihe 2	p-arvo	Vaihe 1	Vaihe 2	p-arvo
Sukupuoli, nainen, N[%]	61[25]	47[19]	-	45[90]	38[95]	-
Taipumus allergiaan						
Astmaoireita, N[%]	13[5]	7[3]	0.674	15[17]	8[9]	0.187
Heinänuha, N[%]	34[14]	28[11]	0.087	17[19]	14[16]	0.843
Ihottuma, N[%]	81[33]	63[26]	0.026	26[30]	17[19]	0.195
Psykososiaaliset tekijät						
Pidätkö työtäsi mielenkiintoisena ja innostavana (usein), N[%]	-	-	-	0[0]	32[36]	0.000
Onko sinulla liikaa töitä (usein), N[%]	-	-	-	0[0]	9[10]	0.000
Onko sinulla mahdollisuus vaikuttaa työösiin	-	-	-	0[0]	7[8]	0.001

(usein), N[%]						
Auttavatko työkaverisi sinua mahdollisten työhön liittyvien ongelmien kanssa (usein), N[%]	-	-	-	0[0]	23[26]	0.000

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Örebro mallin mukaisesti ympäristö- ja oiretekijöiden raportointi molempiin kyselyihin vastanneilla.



Kuva 1. Lasten ja henkilökunnan kokema sisäympäristö verrattuna viitearvoihin ennen (1. vaihe) ja jälkeen (2. vaihe) ilmanvaihdon toimintatavan muutosta.



Kuva 2. Lasten ja henkilökunnan kokemat oireet verrattuna viitearvoihin ennen (1. vaihe) ja jälkeen (2. vaihe) ilmanvaihdon toimintatavan muutosta.

Viitearvoihin nähden lasten vanhemmat raportoivat sisäympäristötekijöistä yleensä vähemmän, mutta oireita raportoitiin enemmän käsien kuivumisen osalta (molemmat kyselyt) ja nenäoireiden osalta (vain 1. vaiheessa). Henkilöstön keskuudessa liian korkea sisäilman lämpötila (vain 2. vaiheessa) ja ihon hilseilyn/kutinan ja keskittymisvaikeuksien raportointi (vain 1. vaiheessa) ylittivät kyselyn viitearvot.

MM40-kysely ei sisällä kysymyksiä hengitystieinfektioista, terveystalvelujen käytöstä tai muista harvinaisemmista oireista ja sairauksista, joten niitä ei ole tarkastelu tässä tutkimuksessa. Muut hengitystieoireet ja -sairaudet, kuten kosteus ja homevaurioihin liitetyt astmaoireet, vaatisivat pidemmän kuin kolmen kuukauden tutkimusjakson [15]. Jotta kyselytutkimuksen tulokset

olisivat vertailukelpoisia, edustavia ja luotettavia, sekä vastausprosentin että otoskoon tulisi olla riittävän suuri. Tässä tutkimuksessa vastausprosentit olivat melko alhaiset (erityisesti lasten osalta) ja kunkin yksittäisen koulun vastausten määrä oli liian pieni, jotta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä yksittäisen koulun tasolla. Tarkemmissa analyyseissa tarkasteltiin ilmanvaihdon toimintatavan muutoksen vaikutuksia kyselyvastauksiin yhdistämällä kahdentoista koulurakennuksen vastaukset ja mittaustulokset, jolloin otoskoko on kokonaisuudessaan suurempi. Koulujen sisäiset riippuvuudet huomioitiin monitasomalleissa koulu- ja huonetunnusten avulla. Tulosten perusteella havaittiin tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä mitattujen ja raportoitujen sisäympäristötekijöiden ja oireiden välillä, mutta ne eivät liittyneet ilmanvaihdon toimintatavan muutokseen. Tarkempien analyysien tulokset raportoidaan muualla [10].

On huomion arvoista, että tässä tutkimuksessa mittaustiedot olivat yhdistettävissä kyselyjen tuloksiin luokkahuonetasolla, mikä on tavanomaista korkeampi resoluutio altistumisolosuhteen paikan suhteen. Vaikka sisäilman laadun mittausten osalta ajallinen resoluutio oli korkea (koko tarkastelujakson aikaiset, jatkuvat mittaukset viiden minuutin väliajoin), standardoidun kyselymenetelmän käyttö kolmen kuukauden muistijaksolla ei mahdollistanut korkeamman tason ajallista mallintamista, vaan mittausdata piti keskiarvoistaa. Tällainen mallintaminen edellyttäisi esimerkiksi päivittäisten oirekyselyiden tai -päiväkirjojen käyttöä tai päivittäisten sairauspoissaolojen kirjaamista, joita ei usein ole helposti saatavilla [3]. Kaiken kaikkiaan suositellaan jatkotutkimuksia suuremmilla otoskokoilla, jotta voidaan tehdä tarkempia johtopäätöksiä havaituista yhteyksistä, ottaen huomioon myös mitattujen parametrien väliset korrelaatiot sekä niiden paikallinen ja ajallinen vaihtelu.

3.3 Energiansäästöpotentiaali

Energiansäästön tutkiminen ei varsinaisesti kuulunut tämän tutkimuksen aihepiiriin. Kuitenkin, koska käyntiaikojen muutoksella on vaikutus myös rakennuksen energian kulutukseen, tehtiin tästä karkea laskelma. Tutkimusjakson aikana toimintatavan muutos (vaiheesta 1 vaiheeseen 2) johti keskimäärin 26 %:n energiansäästöön ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksessa. Energiansäästöpotentiaali on suurempi rakennuksissa, joissa ilmanvaihtoa käytetään täydellä tai osittaisella ilmamäärällä vuorokauden ympäri verrattuna rakennuksiin, joissa ilmanvaihtoa käytetään jaksottaisella periaatteella [16]. Energiansäästöpotentiaali riippuu myös rakennuksen muista ominaisuuksista ja järjestelmistä.

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa saatujen mittauksiin ja kyselyihin perustuvien tulosten mukaan ilmanvaihdon yöaikainen pysäyttäminen ei vaarantanut sisäilman laatua käyttöaikana tutkimuskohteissa, kunhan riittävä ilmanvaihdon huuhtelu toteutuu ennen varsinaista käyttöjaksoa. Ilmanvaihdon pysäyttämisen vaikutuksia sisäilman laatuun tulee kuitenkin arvioida rakennuskohtaisesti ja varmistua siitä, että ilmanvaihto käynnistetään riittävän aikaisessa vaiheessa ennen käyttöjaksoa, jotta mahdolliset epäpuhtauspitoisuudet ehtivät pienentyä. Lisätietoa aihepiiristä löytyy eri julkaisuista mm. Kuntien sisäilmaverkoston julkaisusta julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeesta perustelumuistioineen [16]. Tutkimuksessa mukana olleissa kohteissa ei ollut kosteus- tai homevaurioita tai muita hallitsemattomia sisäilman epäpuhtauslähteitä, joten tuloksia ei voida soveltaa rakennuksiin, joissa on em. lähteitä.

Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J., Laukkarinen, A., Kaasalainen, T., Pihlajamaa, P., Teriö, O., Jokisalo, J., Annala, P., Harsia, P., Hedman, M., Heljo, J., Kallioharju, K., Kauppinen, A., Kero, P., Kivioja, H., Lehtinen, T., Marttila, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Paatero, J., ... Uusitalo, S. (2019).
- [2] Seppanen, O.A. and Fisk, W.J. (2004). Summary of human responses to ventilation. Special Issue of Indoor Air Journal (14) LBNL-55748.
- [3] Haverinen-Shaughnessy, U., Pekkonen, M., Leivo, V., Prasauskas, T., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A., Martuzevicius, D. (2018). Occupant satisfaction with indoor environmental quality and health after energy retrofits of multi-family buildings: Results from INSULAtE-project. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(6), 921–928.
- [4] Rakes, A. and Waring, M.S., 2013. Modeling impacts of dynamic ventilation strategies on indoor air quality of offices in six US cities. *Building and Environment*, 60, pp.243-253.
- [5] Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R.J., Cole, E.C., Toyinbo, O., Moschandreas, D.J. (2015). An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93, 35-40.
- [6] Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D.J., Shaughnessy, R.J. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor air* 21(2), 121-131.
- [7] Sadrizadeh, S., Yao, R., Yuan, F., Awbi, H., Bahnfleth, W., Bi, Y., Cao, G., Croitoru, C., de Dear, R., Haghghat, F. and Kumar, P., 2022. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*.
- [8] Sadick, A.M., Issa, M.H. (2017). Occupants' indoor environmental quality satisfaction factors as measures of school teachers' well-being. *Building and environment*, 119, 99-109.
- [9] Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R. and Jokisalo, J. (2021). Impact of different mechanical ventilation strategies for night purging on indoor air quality in public buildings. In *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 246, 11003.
- [10] Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M. and Hafezi, M., (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, p.895–906.
- [11] Martin, L.W. (1996). *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC).
- [12] Elhassan, Z. A. (2023). Energy consumption performance using natural ventilation in dwelling design and CFD simulation in a hot dry climate: A case study in Sudan. *Front. Built Environ.*, 9, 1145747.
- [13] Ketko, J., (2023). Yöaikaisen ilmanvaihdon sammuttamisen vaikutukset koulujen ja päiväkotien kaasu- ja hiukkaspitoisuuksiin. Diplomityö. Tampereen yliopisto.
- [14] Andersson, K., Fagerlund, I., Bodin, L., Ydreborg, B. (1988). Questionnaire as an instrument when evaluating indoor climate. *Healthy Buildings '88 Stockholm 1988*, Vol 1, 139-146.
- [15] Esty, B., Phipatanakul, W. (2018). School exposure and asthma. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 120(5), 482-487.
- [16] Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon yleisohje ja julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon yleisohjeen perustelumuuisto, 14.3.2019, Kuntien sisäilmaverkosto.

Pienhiukkaset suomalaisten rakennusten sisäilmassa – tuloksia Future Spaces -projektista

Laura Salo¹, Ville Silvonen¹, Ilpo Kulmala², Tuomas Raunima³, Juha Vinha³, Panu Karjalainen¹
ja Topi Rönkkö¹

¹ Tampereen yliopisto, Fysiikka, Aerosolifysiikka

² Teknologian tutkimuskeskus VTT

³ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Future Spaces -projektissa tutkittiin sisäympäristöä laajasti terveyden ja viihtyvyyden näkökulmasta. Yksi merkittävä terveyteen vaikuttava tekijä on sisäilman pienhiukkaspitoisuus. Pienhiukkaset voivat olla lähtöisin sisältä; niitä syntyy esimerkiksi ruoanlaitossa tai siivotessa, mutta myös ulkoilmassa syntyneitä hiukkasia päätyy sisäilmaan ilmavirtojen mukana. Projektissa tehdyn korkeellisen tutkimuksen myötä havaittiin, että merkittävä osa sisäilman hiukkasista oli peräisin ulkoilmasta. Rakennuksissa, jotka olivat liikenteen lähellä, aamuruuhkan vaikutus näkyi selvästi sekä ulko- että sisäilman kohonneena hiukkaspitoisuutena. Pitoisuuden lisäksi tarkasteltiin hiukkasten kokojakaumaa, josta havaittiin, että tehokkaimmin ulkoa sisälle kulkeutuneet hiukkaset olivat kooltaan n. 200 nm ja sisällä mitatussa hiukkaskokojakaumassa oli kaksi moodikokoa: 200 nm ja 70 nm. Hetkellisiä poikkeuksia lukuun ottamatta, pitoisuudet olivat tutkimuskohteissa matalia.

1. Johdanto

Ilmassa on kaikkialla pienhiukkasia (< 0.1 mm), jotka voivat hengitettäessä olla haitaksi terveydelle. Pienhiukkasten lähteitä kaupungeissa ja taajamissa ovat mm. tieliikenne, kotien lämmitys öljyllä tai puulla, teollisuus, satamat ja lentokentät. Suomessa pienhiukkasten on arvioitu aiheuttavan vuosittain n. 1800 ennen aikaista kuolemaa [1] ja lievempien haittojen kuten keuhko- ja sydänsairauksien määrä on moninkertainen. Länsimaissa ihmiset viettävät enemmistön päivästänsä sisätiloissa, mutta ulkoilmaan verrattuna sisäilman pienhiukkasia on tutkittu vähän. Sisäilmassa itsessään hiukkasia voi syntyä muun muassa kynttilöiden polttamisesta, ruoanlaitosta tai siivoamisesta [2]. Ennestään tiedetään myös, että pienhiukkasia kulkeutuu ulkoilmasta sisäilmaan ilmavirtojen mukana, esimerkiksi ikkunaa avattaessa tai koneellisen ilmanvaihdon kautta, sekä rakennusvaipan raoista [3]. Kulkeutuminen on kuitenkin hyvin riippuvaista ympäristöstä ja rakennukseen liittyvistä parametreista, mistä johtuen tutkimustuloksia on usein vaikea yleistää.

Perinteisiä mittaussuureita pienhiukkasille ovat esimerkiksi hiukkasten pitoisuus lukumääränä tai massana. Hiukkasten keuhkodespositioiva pinta-ala (lung-deposited surface area, LDSA) on suure, jonka käyttö on viime aikoina yleistynyt huomattavasti, sillä hiukkasten pinta-ala korreloi massaa tai lukumäärää paremmin toksikologisten vasteiden kanssa [4]. Hiukkasten pinta-ala on merkittävä suure, koska mahdolliset reaktiot keuhkoissa tapahtuvat pintojen välityksellä. Keuhkodespositio viittaa hiukkasen todennäköisyyteen jäädä keuhkoihin hengitettäessä ja se on hiukkaskoon funktio. Sisäilman tutkintaan LDSA on myös siksi hyvä suure, että se on erityisen herkkä 100–200 nm kokoalueella, mikä vastaa nokihiukkasten kokoluokkaa. Nokihiukkasia syntyy epätäydellisen palamisen myötä ja ne ovat yleisiä liikenneympäristöissä. Lisäksi suodattimia ja rakennusvaipan rakoja parhaiten läpäisevä hiukkaskoko on usein 100–200 nm kokoalueella.

Osana Future Spaces -projektia tutkimme ilmanlaatua suomalaisissa kouluissa, päiväkodeissa sekä toimistoissa. Erityisesti tarkastelimme pienhiukkasten kulkeutumista ulkoilmasta sisäilmaan, sekä kulkeutumiseen vaikuttavia parametrejä. Näissä mittauksissa kohteina olivat kaksi toimistorakennusta, kaksi koulua ja kaksi päiväkotia. Toimistorakennuksissa toteutettiin kattavat mittaukset laajalla mittausvälineistöllä ja kouluissa ja päiväkodeissa yksinkertaisemmat anturityyppiset mittaukset. Kaikissa mittauksissa hyödynnettiin korkean aikaresoluution mittalaitteita ja mittaus-ten kestot olivat kahdesta viikosta kolmeen viikkoon.

2. Menetelmät

Toimistokohteissa käytettiin laajaan hiukkaskokojakaumaan soveltuvaa tutkimustasoista mittalaitetta, ELPI+ (Electrical low-pressure impactor, valmistaja Dekati Oy.), jonka avulla keuhkodesoituva pinta-alapitoisuus määritettiin 6 nm -1 µm hiukkasille. Toimisto 1:ssä oli käytössä kaksi mittalaitetta, jotka molemmat asennettiin mobiililaboratorioon (ATMo-Lab, <https://www.tuni.fi/en/research/atmo-lab-aerosol-and-trace-gas-mobile-laboratory>). Toisella mitattiin toimistohuoneen sisäilmaa noin puolentoista metrin korkeudelta ja toisella ulkoilmaa huoneen ikkunoiden edestä. Mittaukset toteutettiin Tampereella joulukuussa 2021. Samat mittalaitteet olivat käytössä myös Toimisto 2:ssa, Helsingissä. Koska toimisto ei ollut Covid-19 pandemian takia käytössä, asennettiin mittalaitteet sisälle, 4. kerroksessa olevaan toimistoon. Toisella ELPI+ -laitteella mitattiin jälleen huoneilmaa ja toinen asennettiin mittaamaan ulkoilmaa katolta (7. kerros), samasta kohdasta mistä ulkoilmaa otettiin ilmanvaihtokoneelle. Mittaukset toteutettiin keväällä 2021. Helsingin toimistossa tehdyistä mittauksista on aiemmin julkaistu diplomityö, josta menetelmiä ja tuloksia voi tarkastella laajemmin [5].

Koulukohteissa käytettiin yksinkertaisempaa anturityyppistä mittausta. Mittalaitteina olivat kaksi Partectoria (valmistaja Naneos), jotka mittaavat hiukkasten keuhkodesoituvan pinta-alan kokonaispitoisuutta. Partectorit ovat ELPI+-laitteeseen verrattuna epätarkempia (mittaustarkkuuden on arvioitu olevan ± 30 % 20 nm – 400 nm kokoalueella [6]), mutta myös pienempiä, edullisempia ja helppokäyttöisempiä. Koulukohteissa huoneilmamittaus tehtiin hieman korkeammalta, n. 2 m korkeudelta, jotta mittalaitteet eivät haitanneet huoneiden käyttöä. Ulkoilman mittausta varten käytettiin suojakotelo, jonka sisälle laite asennettiin ja kiinnitettiin suurin piirtein samalle korkeudelle kuin sisällä, mahdollisimman lähelle kohdehuoneen ikkunoita. Koulukohteiden mittaukset kestivät kukin kaksi viikkoa syksyllä 2021 ja kaikki kohteet olivat Pirkanmaalla. Koulu 3:ssa oli aiemmin havaittu sisäilmaongelmia, minkä takia huoneessa oli ennestään ilmanpuhdistin.

Taulukko 1: Tietoja mittauskohteista ja niiden ympäristöistä.

	Toimisto 1, TRE	Toimisto 2, HKI	Koulu 1, Keskusta	Koulu 2, Keskusta	Koulu 3, Lähiö	Koulu 4, Lähiö
Rakennusvuosi (Korjausvuodet)	1971	1972	2018	1904 (2013)	1952 (2010, 2015)	2013
Huoneen pinta-ala (m ²)	43	25	55	25	56	40
Huoneen tilavuus (m ³)	124	66	160	79	152	130
Huoneen käyttö	Normaali	Ei käytössä	Normaali	Normaali	Normaali	Normaali
Ympäristön kuvailu	Taajama / teollisuus-alue	Kaupunki-keskusta	Kaupunki-keskusta	Kaupunki-keskusta	Lähiö, maataloutta	Lähiö, puisto-mainen

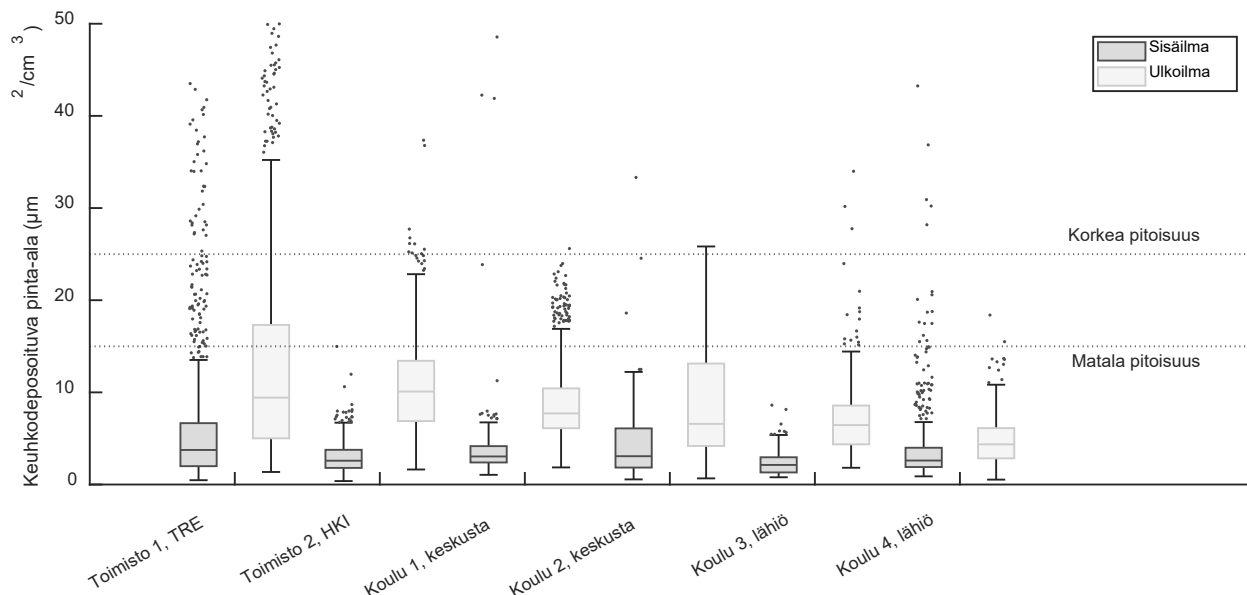
Taulukkoon 1 on kerätty tietoja mittauskohteista. Kaikissa kohteissa oli käytössä koneellinen ilmanvaihto, Toimisto 1:ssä suodatin oli G5-luokkaa ja Toimisto 2:ssa F7-luokkaa. Koulukohteiden

suodatinluokituksia ei saatu tietoon.

Mittaukset tehtiin 1-s resoluutiolla, mutta tulosten tarkastelussa mittausdatasta on laskettu puolen tunnin jaksoista aritmeettinen keskiarvo. Hiukkasten koosta puhuttaessa viitataan niiden aerodynaamiseen halkaisijaan.

3. Tulokset ja niiden tarkastelu

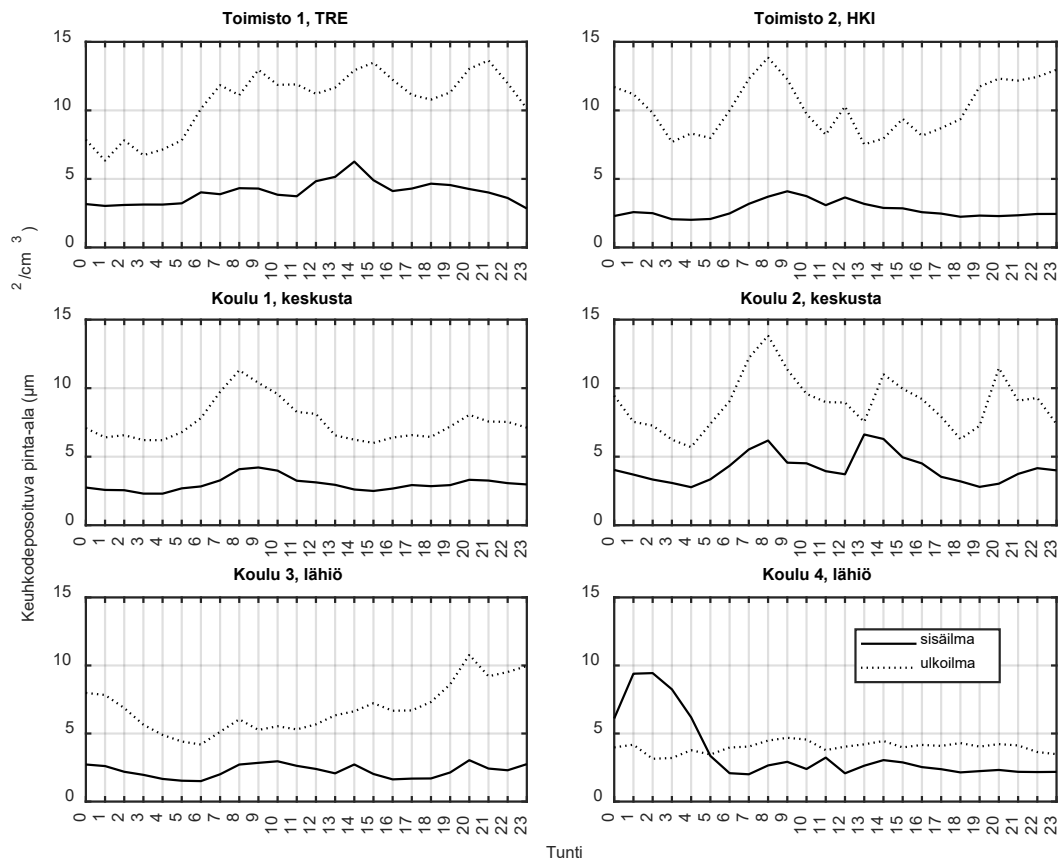
Tarkastellaan ensin kaikkien mittauskohteiden tuloksia yhdessä. Koska koulukohteissa käytetty mittalaite antaa tuloksen keuhkodepositiivana pinta-alana, on se valittu vertailtavaksi suureeksi. Kuvassa 1 on esitetty jokaisen kohteen mediaani, kvartaalit (laatikon reunat) sekä ääriarvot (viikset) ja poikkeamat (erilliset pisteet). Jokaisesta kohteesta on sekä sisä- että ulkoilman pitoisuudet. Tuloksia tarkastellessa on hyvä pitää mielessä erot menetelmissä ja vuodenaajoissa. Esimerkiksi Helsingissä ulkoilman mittaus oli korkealta (7. kerroksesta), eli pitoisuus on todennäköisesti hie- man pienempi kuin se olisi ollut katutasosta mitattaessa, kuten muissa kohteissa. Lisäksi toimito- kohteissa mittaus tehtiin ELPI+:lla, joka mittaa laajempaa hiukkaskokoaluetta, kuin koulukoht- eissa käytetty Partector.



Kuva 1. Keuhkodepositiivana pinta-alapitoisuus tutkituissa kohteissa sisä- ja ulkoilmassa. Osa poikkeavista arvoista (pisteistä) on jäänyt rajauksen takia kuvan ulkopuolelle.

Kuvasta 1 nähdään, että sisäilman pitoisuus oli kaikissa kohteissa pääsääntöisesti ulkoilman pitoisuutta pienempi. Keuhkodepositiivalle pinta-alalle ei ole osoitettu virallisia raja-arvoja, mutta aiemmassa Lontoossa tehdyssä tutkimuksessa matalaksi pitoisuudeksi arvioitiin alle $15 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja vastaavasti korkeaksi pitoisuudeksi yli $25 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ [7]. Käytetään näitä arvoja nytkin tulosten tulkinnassa. Kaikkien kohteiden mediaanit sekä ulkoa että sisältä ovat matalan pitoisuuden alueella. Tampereen toimistolla tehtyjen mittausten aikana ulkoilman pitoisuus nousi reilusti yli matalan pitoisuuden. Tähän johti pakkasjakso, jolloin lähipäästöjä on todennäköisesti ollut enemmän (puunpolttoa omakotitaloalueella) ja päästöt eivät ole laimentuneet matalan rajakerroskorkeuden takia. Sisäilmassa pitoisuudet olivat silti pääsääntöisesti matalat. Koulu 3:n sisäilman pitoisuudet ovat hyvin matalat, mikä osoittaa, että sisäilman puhdistin on toiminut hyvin. Vaikka mediaanipitoisuudet ovat matalia, poikkeavia mittaustuloksia löytyy jonkin verran myös korkean pitoisuuden alueelta.

Tarkastelemalla Kuvassa 2 esitettyjä pitoisuusvaihteluita vuorokauden ajan mukaan, havaitaan esimerkiksi aamun liikenteen vaikutus. Lähes poikkeuksetta pitoisuudet ovat kasvussa aamuisin klo 7, erityisen hyvin tämä näkyy keskustassa sijaitsevien koulujen osalta (Koulu 1 & Koulu 2). Ulkoilmassa kasvu on voimakkaampaa, mutta sama trendi näkyy vaimeampana myös sisäilmassa. Koulu 4:ssä havaittiin pitoisuuden kasvu iltaisin, kun ilmanvaihto säädettiin pienemmälle keskiyöllä. Tilanne kuitenkin palautui normaaliksi aikaisin aamulla, kun ilmanvaihtokoneet säätyivät taas täydelle teholle klo 4.



Kuva 2. Keuhkocodeposituvan pinta-alan vuorokausivaihtelut sisä- ja ulkoilmassa. Kuvan datapisteenä ovat arkipäiviltä ja niistä on laskettu mediaani.

Taulukossa 2 on esitetty sisäilman ja ulkoilman välisen keuhkocodeposituvan pinta-alapitoisuuden suhdeluku sekä näiden välinen determinatiokerroin. Sisäilmayhdistyksen mukaan I-O -suhteen tulee olla alle 0,5 korkeimmassa tavoiteluokassa [8], tosin suhdeluku on määritetty hiukkasten massapitoisuudelle, joka voi poiketa näistä arvoista, jos hiukkasten kokojakaumat ulkona ja sisällä ovat erilaiset. Tämä taso saavutetaan kaikissa kohteissa paitsi Koulu 4:ssä, mutta kuten Kuvasta 2 nähdään, korkeammat pitoisuudet on mitattu öisin, jolloin sisätilassa ei ole ihmisiä altistumassa. Lisäksi ulkoilman pitoisuuskin oli tässä kohteessa matala vuorokauden ajasta riippumatta, jolloin tätä tavoitetta on vaikea saavuttaa.

Taulukko 2. Sisä- ja ulkoilman pitoisuuksien suhdeluku (I-O suhde) sekä näiden välinen determinatiokerroin (R^2).

Mittauskohde	I-O suhde	R^2
Toimisto 1, TRE	0,39	0,71
Toimisto 2, HKI	0,23	0,61
Koulu 1, keskusta	0,39	0,74
Koulu 2, keskusta	0,46	0,89
Koulu 3, lähiö	0,34	0,53
Koulu 4, lähiö	0,64	0,10

Kokonaispitoisuuksien lisäksi toimistokohteista mitattiin ELPI+-mittalaitteella hiukkasten kokojakaamaa. Hiukkasten jakauma oli molemmissa toimistoissa kaksimoodinen, ensimmäinen moodi oli ~70 nm ja toinen moodi ~200 nm. Ulkona ja sisällä tehtyjä mittauksia vertaamalla, havaittiin, että hiukkasten läpäisy oli kokoriippuvuudeltaan hyvin samankaltainen kuin IV-kanavien suodatimille mitatut läpäisy ja n. 200 nm hiukkaset kulkeutuivat parhaiten ulkoilmasta sisäilmaan. Tässä kokoluokassa tyypillisiä hiukkaslähteitä ovat ikääntyneet pakokaasupäästöt ja puunpolton savu, kun taas 70 nm hiukkaset ovat pääsääntöisesti tuoreita pakokaasupäästöjä. Kaikissa kohteissa paitsi Koulu 4:ssä oli voimakas korrelaatio ulko- ja sisäilman hiukkaspitoisuuksien välillä ($R^2 > 0.5$) ja ulkoilman hiukkasten kulkeutuminen sisäilmaan oli pääasiallinen hiukkaslähte. Hiukkasaltistukselle ei ole voitu esittää turvallista pitoisuutta, vaan terveyshaitat lisääntyvät jo pienestäkin lisääntymisestä. Siksi aina, kun altistumista voidaan helposti vähentää, kannattaa se tehdä. Tutkituissa kohteissa hiukkaspitoisuuksia voisi pienentää esimerkiksi käyttämällä laadukkaampia suodattimia tai ilmanpuhdistinta, kuten Koulussa 3 oli tehty, sekä tilkitsemällä mahdollisia vuotokohtia ikkunoiden ja ovien pielissä. Lisäksi ikkunoiden aukipitämistä tulisi välttää etenkin ruuhka-aikoina.

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa oli mukana kuusi kohdetta, joista mitattiin samanaikaisesti sisä- ja ulkoilman pienhiukkasten keuhkodespositiivaa pinta-alaa, joka on terveyden kannalta tärkeä suure. Tuloksista havaittiin, että ulkoilman hiukkaspitoisuus vaikutti voimakkaasti sisäilman pitoisuuksiin ja koska ulkoilman pitoisuus oli mittausten aikana pääsääntöisesti matala, pysyi se matalana sisälläkin. Parhaiten ulkoa sisälle kulkeutuivat n. 200 nm hiukkaset, joita syntyy esimerkiksi pakokaasuperäisten hiukkasten ikääntyessä tai puunpoltosta. Sisäilman hiukkasjakaumalla oli kaksi moodia, joista toinen oli juuri 200 nm ja toinen noin 70 nm, joka taas vastaa kooltaan tuoreita pakokaasupäästöjä. Sisäilman hiukkasten mittauksissa olisi tärkeä keskittyä menetelmiin, jotka kohdistuvat tälle hiukkaskokoalueelle.

Tutkimuksen rahoitus ja kiitokset

Tämä tutkimus tehtiin osana Business Finlandin Future Spaces -projektia ja osa rahoituksesta on yrityksiltä: Koja Oy., A-Insinöörit Suunnittelu Oy., Tampereen Tilapalvelut Oy., TPI Control Oy. ja Dekati Oy. Haluamme lisäksi kiittää seuraavia tutkimuksessa avustaneita henkilöitä: Niina Kuittinen, Jussi Hoivala ja Teemu Lepistö.

Lähdeluettelo

- [1] ”Pienhiukkasten vaikutusmekanismit”, *Terveyden ja hyvinvoinnin laitos*, 19. syyskuuta 2019. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/pienhiukkasten-vaikutusmekanismit> (viitattu 17. toukokuuta 2023).
- [2] N. R. Martins ja G. Carrilho da Graça, ”Impact of PM2.5 in indoor urban environments: A review”, *Sustainable Cities and Society*, vsk. 42, ss. 259–275, loka 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.07.011.
- [3] E. Diapouli, A. Chaloulakou, ja P. Koutrakis, ”Estimating the concentration of indoor particles of outdoor origin: A review”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vsk. 63, nro 10, ss. 1113–1129, loka 2013, doi: 10.1080/10962247.2013.791649.
- [4] O. Schmid ja T. Stoeger, ”Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung”, *Journal of Aerosol Science*, vsk. 99, ss. 133–143, 2016, doi: 10.1016/j.jaerosci.2015.12.006.
- [5] V. Silvonen, ”Ulkoilman aerosolihiukkasten kulkeutuminen sisäilmaan: Kirjallisuusselvitys ja tapaustutkimus”, Diplomityö, Tampere University, 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202205034314>
- [6] M. Fierz, D. Meier, P. Steigmeier, ja H. Burtscher, ”Aerosol Measurement by Induced Currents”, *Aerosol Science and Technology*, vsk. 48, nro 4, ss. 350–357, huhti 2014, doi: 10.1080/02786826.2013.875981.
- [7] R. U. Shah *ym.*, ”Identifying Patterns and Sources of Fine and Ultrafine Particulate Matter in London Using Mobile Measurements of Lung-Deposited Surface Area”, *Environ. Sci. Technol.*, vsk. 57, nro 1, ss. 96–108, tammi 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c08096.
- [8] Sisäilmayhdistys, ”Sisäilmastoluokitus 2018”.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen päivityksen vaikutus mineraalikuitunäytteisiin

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

¹ Sirate Group Oy

² Turun yliopisto, Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Tiivistelmä

Kansainvälisestä käytännöstä poiketen Suomessa sisätilojen kuitupitoisuuksia määritetään vuonna 2015 annetun asumisterveysasetuksen mukaisesti huonepinnoille laskeutuneesta pölystä. Viralliset, vallinneesta käytännöstä poikenneet näytteenotto-, analysointi- ja tulkintaohjeet annettiin vasta asetuksen soveltamisohjeen päivityksissä joulukuussa 2020 ja maaliskuussa 2021. Asetuksen toimenpiderajaa ei kuitenkaan muutettu. Soveltamisohjeen muutoksen myötä laboratoriot muuttivat myös tuloilmajärjestelmästä otettujen kuitunäytteiden ("kanavanäytteet") laskentaperusteita. Tässä, osana vuosina 2022–2024 toteutettavaa Rakennusterveystietokantahanketta tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin soveltamisohjeen päivityksen vaikutusta kuitunäytteiden tuloksiin. Julkisista rakennuksista vuosina 2012–2023 otettujen yhteensä 6675 kuitunäytteen perusteella menetelmämuutoksilla ei ole ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta yksittäisten laskeumanäytteiden kuitupitoisuuksiin. Tulosten tulkintaohjeen muutoksen vaikutuksesta kuitenkin samoilla näytekohtaisilla tuloksilla toimenpiderajan ylittävien tilojen määrä jää alle puoleen aiemmasta. Laskeumanäytteiden lisäksi myös tuloilmajärjestelmän kuitunäytteiden analyyseissä havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero laboratorioden välillä.

1. Johdanto

Silmien, ihon ja ylähengitysteiden ärsytysoireita aiheuttavia teollisia mineraalivillakuituja sisältäviä äänenvaimennus- ja lämmöneristet tuotteita on käytetty lähes jokaisessa suomalaisessa rakennuksessa. [1–4] Kansainvälisistä ilmanäyttemenetelmistä [5,6] poiketen Suomessa sisätilojen kuitupitoisuuksia määritetään 14 vrk aikana huonepinnoille laskeutuneesta pölystä geeliteipeille kerättävien näytteiden avulla. Menetelmä viitearvoineen pohjautuu Tanskassa 1980–90-luvuilla tehtyihin tutkimuksiin [7] ja sen käyttöönotto Suomessa perustui vuonna 2006 toteutetun 10 rakennusta kattaneen tutkimuksen [1] suositukseen. Vastoin kansainvälisiä menetelmiä näytteistä päädyttiin laskemaan vain yli 20 µm pituiset kuidut (esim. WHO laskentakriteerit: pituus $L > 5$ µm, halkaisija $D < 3$ µm ja $L:D > 3:1$), joilla katsottiin olevan merkitystä ihon, silmien ja ylähengitysteiden ärsytysoireiden kannalta.

Laskeumanäytteet kerättiin aluksi suoraan huonepinnoilta tai erikseen kohteeseen viedyiltä laskeumalevyiltä, kunnes Työterveyslaitoksen marraskuussa 2012 muuttaman näytteenotto-ohjeistuksen myötä näytteitä alettiin kerätä kohteeseen vietyjen muovisten petrimaljojen kansilta. [8] Menetelmä vakiintui yleiseen käyttöön ja vuoden 2015 Asumisterveysasetuksessa [9] asetettiin toimenpiderajaksi jo viitteessä [7] esitetty 0,2 kuitua/cm². Asetuksessa tai sen vuonna 2016 julkaistussa soveltamisohjeessa ei kuitenkaan esitetty näytteenotto-, analyysi- tai tulkintaohjeita.

Asetuksen soveltamisohjetta päivitettiin teollisten mineraalikuitujen osalta joulukuussa 2020 ja maaliskuussa 2021. [1] Yhtenä perusteena päivitykselle oli jo tämän hankkeen pilottina toteutetussa opinnäytetyössä todetut erot kuitutuloksissa eri laboratorioden välillä. [9]

Työterveyslaitoksen katsauksen [2] suositusten mukaisesti soveltamisohjeen päivityksessä palattiin ilman perusteluja aiempaan menetelmään – keräämään näytteet suoraan huonepinnoilta. Näytteitä suositeltiin ottamaan vähintään 3 kpl jokaisesta tutkittavasta tilasta ja yksittäisen näytetuloksen sijasta tuloksena tuli käyttää keskiarvoa (katsauksessa [2] kuitutulosten mediaani oli jo vuosien ajan ollut alle 0,1 kuitua/cm²), jota verrataan toimenpiderajaan mittausepävarmuus huomioiden (eli vähentäen tuloksesta). Aiemmin käytettyä laskentakriteeriä (kuidun pituus yli 20 µm) muutettiin siten, että näytteistä lasketaan halkaisijaltaan vähintään 3 µm kuidut, joiden pituuden suhde halkaisijaan (L:D) on vähintään 3:1. Mittausepävarmuuden määrittäminen jätettiin laboratorioiden tehtäväksi ja analyysivastauksissa se on vaihdellut välillä 10–40 %. Vaikka menetelmää, analyysikriteereitä ja tulosten tulkintaperusteita muutettiin, toimenpiderajaa ei päivitetty. IV-järjestelmän näytteiden ohjearvona on käytetty vaihtelevin tavoin Työterveyslaitoksen palveluaineistonsa keskimääräiseksi esittämää pitoisuutta 10–30 kuitua/cm².

Muutosten vaikutuksesta kuitunäytteiden tuloksiin on julkaistu vain yksittäisiä tutkimuksia. Yhdestä aiemmin toistuvasti kuituongelmaiseksi todetusta koulurakennuksesta otettujen lähes 500 näytteen perusteella eri laskentakriteereillä ei havaittu merkittävää eroa näytekohtaisiin tuloksiin. [12] Eri menetelmillä otettujen näytteiden kuitupitoisuudet jäivät myös aiempaa matalammiksi todennäköisesti sen vuoksi, että käyttäjät eivät olleet laskeumajaksolla paikalla. Kuitujen laskeutumisen todettiin aiempien tulosten mukaisesti sattumanvaraiseksi eikä eri näytteenottoaikkojen välillä havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa.

2. Aineisto ja menetelmät

Tämä tutkimus on osa vuosina 2022–2024 toteutettavaa Rakennusterveystietokanta -hanketta, jossa kehitettävään relaatiotietokantaan kerätään vuosien 2012–2023 aikana Sirate Group Oy:n julkisten rakennusten kunto- ja sisäilmatutkimuksista kertynyttä aineistoa. Tietokanta sisältää jo nyt kymmeniätuhansia luokiteltuja teknisiä mittaus- ja analyysituloksia.

Kuitunäytteiden osalta tutkimusaineisto koostuu yhteensä 4738 laskeumanäytteen (14 vrk) sekä 1937 tuloilmajärjestelmien sisäpinnoilta kerätystä näytteestä, jotka on analysoitu neljässä eri laboratoriossa L1–L4. Laskeumanäytteistä 3566 kpl on kerätty vanhalla menetelmällä vuosina 2012–2021 ja 1172 uudella vuosina 2021–2023 (Taulukko 1). Tuloilmajärjestelmien sisäpinnoilta kerättyjä näytteitä (kanavanäytteet) on vastaavasti 1638 ja 299 kpl.

Taulukko 1. Tietokannan mineraalikuitujen laskeumanäytteiden vuosittaiset tunnusluvut.

Vuosi	Koko	Näytteitä	Hylättyjä	Keskiarvo [1/cm ²]	Mediaani [1/cm ²]	P90 [1/cm ²]
2012	> 20 µm	88	2,3 %	0,15	0,14	0,32
2013	> 20 µm	181	3,3 %	0,15	0,14	0,21
2014	> 20 µm	284	0,7 %	0,13	0,14	0,21
2015	> 20 µm	389	0,3 %	0,08	< 0,1	0,14
2016	> 20 µm	326	1,2 %	0,09	< 0,1	0,14
2017	> 20 µm	386	7,0 %	0,13	< 0,1	0,36
2018	> 20 µm	608	2,0 %	0,10	< 0,1	0,29
2019	> 20 µm	575	1,7 %	0,10	< 0,1	0,21
2020	> 20 µm	490	2,2 %	0,14	< 0,1	0,29
2021	> 20 µm	239	3,8 %	0,14	< 0,1	0,36
2021	> 3 µm, L:D>3:1	433	1,2 %	0,12	< 0,1	0,29
2022	> 3 µm, L:D>3:1	571	1,4 %	0,12	< 0,1	0,29
2023	> 3 µm, L:D>3:1	168	3,0 %	0,07	< 0,1	0,14
Kaikki	> 20 µm	3566	2,4 %	0,11	< 0,1	0,28
Kaikki	> 3 µm, L:D>3:1	1172	1,5 %	0,11	< 0,1	0,28

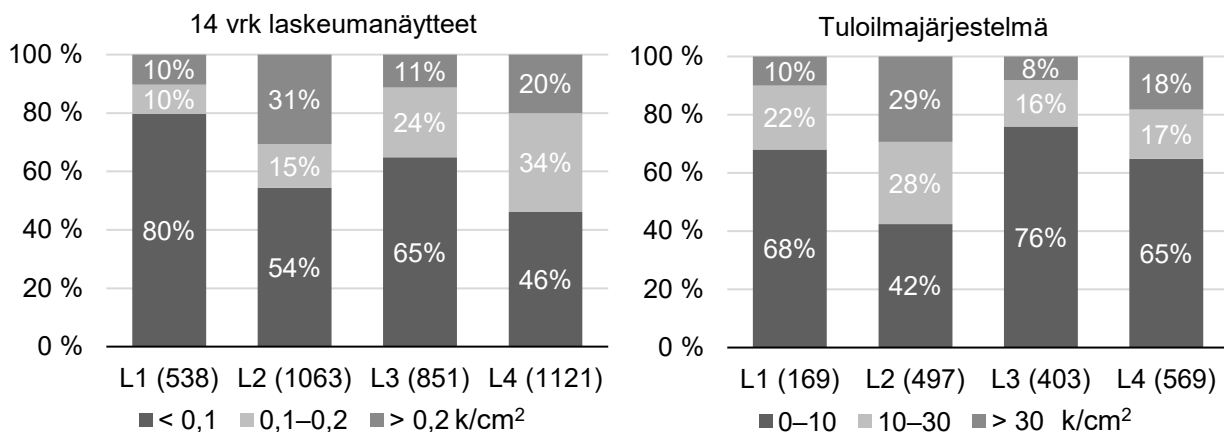
Tilastollista tarkastelu varten laskeumanäytteiden tuloksista on hylätty selvästi tavanomaisesta poikkeavat tulokset ($>1,0$ kuitua/cm²). Vastaavasti IV-järjestelmän näytteistä on hylätty yli 100 kuitua/cm² olevat tulokset (osa laboratorioista lopettaa laskennan kuitupitoisuuden ylittäessä selvästi arvon 30 kuitua/cm²). Vaikka 14 cm² kokoisilta geeliteipeiltä lasketaan yksittäisiä kuituja, ilmoittaa useampi laboratorio menetelmän määrittäjärajaksi arvoa 0,1 kuitua/cm² (1,4 kpl/näyte), eikä näissä vastauksissa aina ole eroteltu havaittuja 0 tai 1 kuitua. Tilastollisissa analyyseissä nämä on luokiteltu yhdeksi luokaksi.

Eri näytteenotto- ja analyysimenetelmien eroa tarkasteltiin tilastollisesti riippumattomien otosten t-testillä (kaksisuuntainen) ja eroja eri laboratorioiden näytetulosten välillä on selvitetty Khiin neliö -menetelmällä.

3. Tulokset

3.1 Laboratorioiden väliset erot

Laboratorioiden välisten erojen selvittämiseksi (vanha, vuoteen 2021 käytössä ollut menetelmä) sekä laskeuma- että kanavanäytteiden tulokset luokiteltiin toimenpiderajan ja ohjearvojen perusteella. Laskeumanäytteet luokiteltiin kuitupitoisuuksien perustella kolmeen luokkaan: alle määrittäjärajan ($< 0,1$ k/cm²), alle toimenpiderajan (0,1–0,2 k/cm²) ja toimenpiderajan ylittävät ($>0,2$ k/cm²). Vastaava kanavanäytteiden tulosluokat ovat: 0–10, 10–30 ja >30 k/cm². Eri laboratorioiden analyysivastausten jakautuminen em. luokkiin on esitetty kuvassa 1.



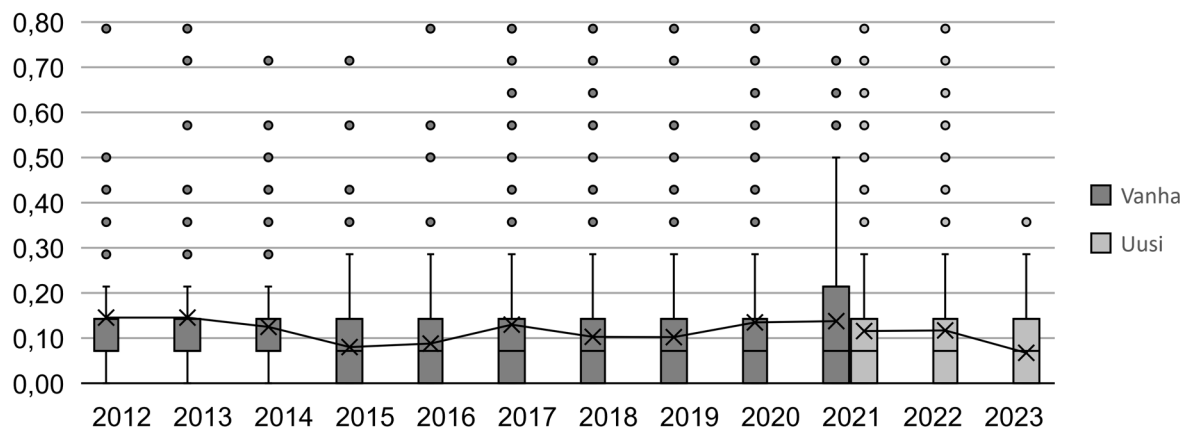
Kuva 1. Eri laboratorioiden L1–L4 kuitunäytteiden osuudet eri kuitupitoisuusluokissa laskeuma- ja kanavanäytteissä. Laboratoriotunnusten perässä sulkeissa on esitetty näytemäärät.

Kuvan perusteella laboratorioiden tulosjakauksissa on selkeitä eroja. Laskeumanäytteissä toimenpiderajan ylittävien näytteiden osuus kaikista näytteistä vaihteli välillä 10–31 % ja vastaavasti ns. nollanäytteiden määrä välillä 46–80 %. Kanavanäytteissä erot olivat samaa suuruusluokkaa. Erot todettiin Khiin neliö -testillä molemmissa tapauksissa tilastollisesti erittäin merkitseviksi: laskeumanäytteillä $X^2(6) = 332,2$, $p < 0,001$ ja kanavanäytteillä $X^2(6) = 132,2$, $p < 0,001$.

3.2 Laskenta- ja analyysimenetelmien muutoksen vaikutus

Taulukossa 1 esitettyjen laskeumanäytteiden näytekohtaisten kuitupitoisuuksien vuosittaista vaihtelua on havainnollistettu kuvassa 2, jossa on esitetty sekä vanhalla että uudella menetelmällä otettujen näytteiden tunnusluvut: laatikoiden ala- ja yläreunat vastaavat ala- ja yläneljänneksiä,

viiva laatikon sisällä mediaania ja rasti keskiarvoa. Janan päät vastaavat pienintä ja suurinta arvoa yli 1,5 laatikon korkeuden päässä laatikon reunasta olevat poikkeavia pisteitä.



Kuva 2. Laskeumanäytteiden näytekohtaisten pitoisuuksien vuosittaisen tunnusluvut sekä vanhalla että uudella menetelmällä.

Kahden riippumattoman otoksen t-testin perusteella näytteenotto- ja laskentamenetelmien muutos ei ole aiheuttanut merkitsevää eroa tuloksiin, $t(4634) = 0,731$; $p = 0,465$. Kanavanäytteillä ei myöskään havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa, $t(1832) = 1,557$; $p = 0,120$.

3.3 Tulosten tulkintamuutosten vaikutus

Tarkasteltaessa yksittäisten näytteiden kuitupitoisuuksia, toimenpiderajan $0,2$ kuitua/cm² ylittäviä tuloksia on ollut vuosittain 9–29 % näytteistä (Taulukko 2). Kaikkiaan vuosina 2012–2023 otetuista näytteistä 20 % on toimenpiderajan ylittäviä sekä vanhalla ($n = 700$) että uudella menetelmällä ($n = 240$). Uudella menetelmällä vähintään 3 näytteen keskiarvon perusteella kuitenkin enää 13 % tiloista ($49/372$) ylittää samoilla tuloksilla toimenpiderajan. Vähennettäessä laboratoriodien ilmoittama mittausepävarmuus, enää 9 %:ssa tutkituista tiloista ylitetään toimenpideraja.

Taulukko 2. Näytekohtaiset tulokset, jotka ylittävät toimenpiderajan ($0,2$ kuita/cm²) vuosittain sekä vanhalla että vuonna 2021 käyttöön otetulla uudella näytteenotto- ja laskentamenetelmällä.

Vuosi	koko	tmp-rajan ylitykset [kpl]	tmp-rajan ylitykset [%]
2012	> 20 μm	19	22 %
2013	> 20 μm	44	24 %
2014	> 20 μm	54	19 %
2015	> 20 μm	36	9 %
2016	> 20 μm	36	11 %
2017	> 20 μm	97	25 %
2018	> 20 μm	119	20 %
2019	> 20 μm	96	17 %
2020	> 20 μm	130	27 %
2021	> 20 μm	69	29 %
2021	> 3 μm	98	23 %
2022	> 3 μm	121	21 %
2023	> 3 μm	21	13 %
YHT	>20 μm	700	20 %
YHT	>3 μm	240	20 %

4. Yhteenveto

Vuonna 2021 Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen päivityksen myötä voimaan tulleet ensimmäiset viralliset teollisten mineraalikulitujen näytteenotto-, laskenta- ja tulkintaohjeet poikkesivat selvästi aiemmin vallinneista käytänteistä, joiden mukaisiin näytteisiin perustuvaa Asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa ei kuitenkaan muutettu.

Yli 4700 julkisista rakennuksista otetun laskeumanäytteen tulosten tilastollisen analyysin perusteella näytteenotto- ja laskentamenetelmien muutos ei aiheuttanut tilastollisesti merkitsevää eroa näytekohtaisiin pitoisuuksiin. Uuden tulkintaohjeen mukainen vähintään kolmen näytteen keskiarvon käyttö vähensi kuitenkin selvästi toimenpiderajan ylityksiä (20 %:sta 13 %:iin tutkituista tiloista). Tämä oli jo ohjetta laadittaessa oltava tiedossa, koska yksittäisten näytteiden mediaanipitoisuudet olivat jo vuosia olleet selvästi alle toimenpiderajan (yli puolet näytteistä ns. nollanäytteitä). Kun keskiarvoista vähennettiin laboratorioden ilmoittamat mittaasepäätarkkuudet (10–40 %), toimenpiderajan ylittävien tilojen osuus pieneni 9 %. Samoilla näytetuloksilla aiemmalla menetelmällä tiloista toimenpiderajan ylittäviä olisi siis ollut siis yli kaksi kertaa enemmän.

Kuitunäytteiden tulokset vahvistivat myös aiempia tuloksia siitä, että eri laboratorioden välisissä tuloksissa on tilastollisesti merkitseviä eroja niin teollisten mineraalikulitujen laskeumanäytteissä kuin tuloilmajärjestelmästä otetuissa näytteissä. Suuren näytemäärän vuoksi erot eivät selity tutkittujen rakennusten eroilla.

Lähdeluettelo

- [1] Kovanen, K., Heimonen, I., et.al. Ilmanvaihtolaitteiden hiukkaspäästöt: altistuminen, mittaaminen ja tuotetestaus. VTT Tiedotteita 2360, 62 s. Espoo 2006.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2360.pdf>.
- [2] Tuomi T., Wallenius K., Mahiout S., Rautiala S. ja Lappalainen S. (2020): Teolliset mineraalikulidut toimistotyypissä työtiloissa: Esiintyminen, altistumisen arviointi, terveysvaikutukset ja päästöjen hallinta. Työterveyslaitoksen julkaisu. 57 s.
<https://urn.fi/URN:ISBN:9789522619167>.
- [3] WHO (World Health Organization) 2000. Air Quality Guidelines for Europe, 2nd edition, WHO Regional Publications, European Series, No. 91, 2000.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107335/9789289013581-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Pitkäranta, M., (toim), Rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016, Ympäristöministeriö, Helsinki 2016.
- [5] WHO 1997. Determination of Airborne Fibre Number Concentrations - A Recommended method, by Phase Contrast Optical Microscope (membrane filter method). Genova 1997.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41904/9241544961.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [6] CDC (Centers for Disease Control and Prevention), NMAM 7400: Asbestos and other fibers by PCM. NIOSH Manual of Analytical Methods, 1994.
<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/7400.pdf>
- [7] Schneider, T. Synthetic vitreous fibers in Indoor Air Quality Handbook. edit. Spengler, J., Samet, J. and McCarthy, J. McGraw-Hill, New York 2001.
- [8] Kuitunäytteen ottaminen teippimenetelmällä. Näytteenotto-ohje, Työterveyslaitos, marraskuu 2012.
- [9] Sosiaali- ja terveysministeriö (2015), Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja

muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.

- [10] Valvira (2016) Asumisterveysasetuksen soveltamisohje 8/2016. Päivitykset osaan III: 21.12.2020 ja 24.3.2021.
- [11] Talvitie, O., Teolliset mineraalikuidut - Mittausmenetelmät ja palvelunäytetietokanta. Opinnäytetyö, 42 s, Turun ammattikorkeakoulu, 2019.
- [12] Koskinen, V., Häkkilä, S., Pessi, A.-M. ja Murtoniemi, T., Counting man-made mineral fibres from settled dust: comparison of three sampling methods, Proceedings of the 17th International Conference of the ISIAQ, Indoor Air 2002.

B8. Vähähiilinen ja energiatehokas rakentaminen

Rakennuksen pitkäaikaiskestävyyden selvittäminen osana elinkaariominaisuuksien tarkastelua

Janita Rintala
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

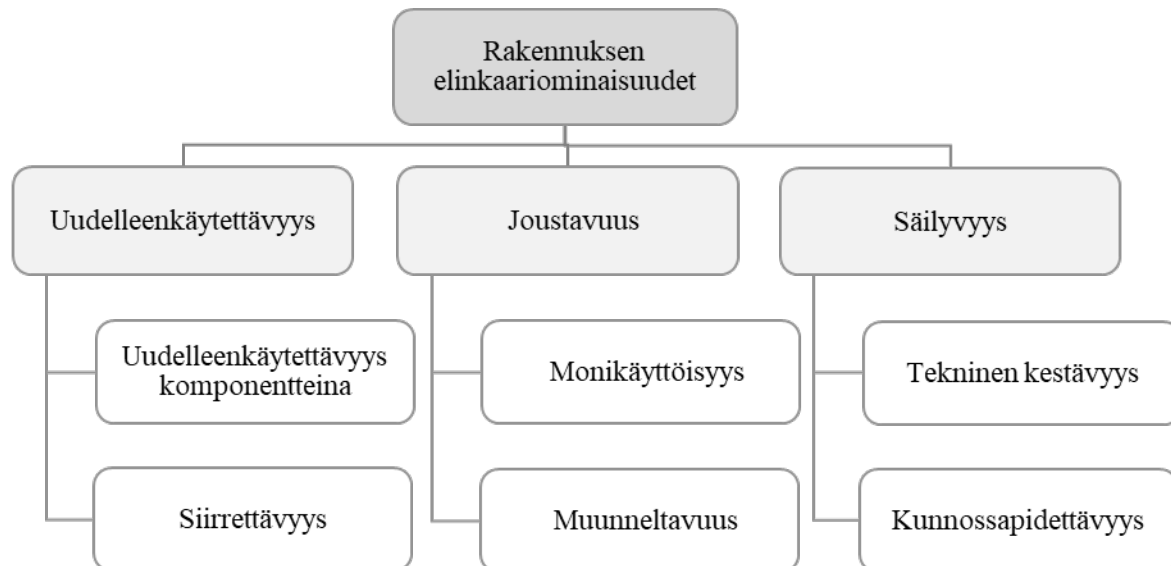
Rakennuksen pitkäaikaiskestävyys eli säilyvyys voidaan jakaa rakennuksen ja sen osien tekniseen kestävyYTEEN ja kunnossapidettävyyTEEN. Säilyvyys on omana elinkaariominaisuutenaan arvokas, ja lisäksi se tukee muiden elinkaariominaisuuksien toteuttamista. Säilyvyyttä ja siihen liittyvien näkökulmien suunnitteluperusteita tarkasteltiin kirjallisuustutkimuksella, kyselytutkimuksella rakennusvalvontaviranomaisille sekä haastatteleamalla rakennesuunnittelijoita osana artikkelin pohjana toimivaa diplomityötä.

Tutkimuksessa luotiin pohja rakennuksen pitkäaikaiskestävyysominaisuuksien selvitykselle, joka voidaan toimittaa asiakirjana rakennusluvan haun yhteydessä. Selvityspohjan muotoilussa huomioitiin tutkimuksessa esiin nousseet näkökulmat pitkäaikaiskestävyydestä. Pohja perustuu Talo2000-luokitteluun, ja lisäksi siinä nostetaan esiin erityisiä riskejä ja erityisen hyvin toteutettuja ratkaisuja rakennuksen säilyvyyden näkökulmasta. Pohjan toimivuutta testattiin casekohteessa, ja sen todettiin soveltuvan hyvin pitkäaikaiskestävyysominaisuuksien erittelyyn tavanomaisessa asuinkerrostalokohteessa. Voidaan olettaa, että rakennusten säilyvyyden vertailu saman käyttötarkoitukseluokan rakennuksissa on selvityspohjan avulla mahdollista.

1. Johdanto

Kiertotalous on talousmalli, jossa pyritään pidentämään materiaalien käyttöaika ja samalla vähentämään primaarimateriaalin ja uusiutumattoman energian käyttöä. Kiertotalous on siis paljon muutakin kuin kierrätystä tai toimivan materiaalikierron valmistamista: on ensisijaisen tärkeää, että materiaalit ja osat kestävät käyttötarkoituksessaan mahdollisimman pitkään, jolloin niiden arvo säilyy eikä uusia materiaaleja ole välttämätöntä tuottaa.

Rakennusten, kuten muidenkin tuotteiden, kestävyys käytössä on tunnistettu kiertotalouden indikaattoriksi [1–3]. Rakennusten näkökulmasta puhutaan uuden rakentamislain mukaisesta säilyvyydestä rakennuksen elinkaariominaisuutena (kuva 1), mikä sisältää näkökulmat rakennuksen ja sen osien tekniseen kestävyYTEEN ja kunnossapidettävyyTEEN [4]. Voidaan todeta, että pitkäaikaiskestävyys eli säilyvyys on omana elinkaariominaisuutenaan ja elinkaaristrategianaan arvokas, ja sopii erityisen hyvin rakennuksiin, joiden oletetaan säilyvän käyttötarkoituksessaan pitkään kuten museoihin, kirkkoihin ja muihin arvorakennuksiin.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaariominaisuudet [5].

Koska säilyvyys on oleellinen kiertotalouden indikaattori, tulisi rakennuksen kiertotaloudesta puhuttaessa tätä näkökulmaa pystyä tarkastelemaan ja vertailemaan kierrätettävyyden ja ympäristövaikutusten tapaan. Vertailu, tunnistaminen ja mittaaminen tekevät ilmiön näkyväksi.

Säilyvyys on rakennuksen laatuominaisuus, joka ei ole suoraan mitattavissa, koska muuttujia on paljon. Esimerkiksi rakennuksen ympäristöolosuhteet, käyttö ja ylläpidon taso vaikuttavat siihen, miten pitkään rakennuksessa olevat materiaalit ja osat käytössä kestävät. Säilyvyyden tarkastelu on siten laadullista, mutta tämä mahdollistaa silti rakennusten vertailun energialaskelmien tapaan käyttöluokittain.

Lisäksi on huomioitava, että monessa rakennuksessa vanhanaikaistuminen, heikko käyttöaste ja kaavoitus vaikuttavat siihen, että hyvin säilyneitäkin rakennuksia puretaan ennenaikaisesti. On kuitenkin huomioitava, että rakennuksen säilyvyys tukee myös muiden elinkaariominaisuuksien, joustavuuden ja uudelleenkäytettävyyden, toteutumista. Hyvin säilyneiden ja terveellisten rakennusten muunneltavuus on yhä mahdollista ilman mittavien sisäilmaongelmien tai kantavien rakenteiden haasteiden ratkomista, ja toisaalta rakennusten ja sen osien riittävä tekninen käyttöikä ja ominaisuuksien säilyminen ovat edellytyksiä myös osien uudelleenkäytölle. [6]

Tämän artikkelin väitteet ja johtopäätökset perustuvat Janita Rintalan diplomityön ”Rakennuksen pitkäaikaiskestävyysominaisuuksien tarkastelu osana rakennuksen elinkaariominaisuuksia” (2023) [6] tuloksiin.

2. Näkökulmia pitkäaikaiskestävyyden tarkasteluun

Diplomityössä pitkäaikaiskestävyyttä tutkittiin kirjallisuustutkimuksen, rakennusvalvonnalle lähetetyn kyselytutkimuksen ja kokeneiden rakennesuunnittelijoiden haastatteluiden keinoin. Näillä keinoilla pyrittiin selvittämään, mikä on säilyvyyden ja pitkäaikaiskestävyyden tarkastelun ja ohjeiden nykytila, missä asioissa tällä hetkellä on haasteita ja miten selvitys rakennuksen pitkäaikaiskestävyydestä voisi vastata näihin haasteisiin. [6]

2.1 Pitkäaikaiskestävyys kirjallisuudessa

Diplomityön kirjallisuustutkimuksen perusteella perusmateriaalien (puu, teräs, betoni ja muuratut

rakenteet) suunnittelusta on saatavilla hyvin tietoa, tutkimuksia ja ohjeita. Erityisesti eurokoodit ottavat yksityiskohtaisesti kantaa kantavien rakenteiden rasitusluokkien ja säilyvyyden suunnitteluun. Haasteet suunnitteluohjeissa keskittyvät liittyviin materiaaleihin, pinnoitteisiin ja vaipan rakenneosiin, joista on saatavilla huonosti kolmannen osapuolen varmentamia tutkimuksia ja ohjeita, ja materiaalikehitys on niin nopeaa, että sopivista ja laadukkaista materiaaleista perille pääseminen ja ajan tasalla pysyminen on haastavaa. [6]

Toinen haaste liittyy kunnossapidettävyyden tarkasteluun. Oleellisena osana kunnossapidettävyyden tarkastelua on käyttö- ja huolto-ohjeen laadinta, mutta kunnossapidettävyyden suunnitteluun liittyy muutakin rakennesuunnittelun näkökulmasta. Oleelliset haasteet liittyvät esimerkiksi rakenteiden korjattavuuteen, helppoon käsiksi pääsyyn esimerkiksi talotekniikan osalta ja sopivan teknisen käyttöiän ja huoltotarpeen yhteensovittamiseen tilaajan toiveiden kanssa esimerkiksi vaipan ja pintamateriaalien osalta. [6]

Ei ole selkeitä ohjeita siihen, miten rakennuksen osat suunnitellaan erityisen helposti korjattaviksi tai ylläpidettäviksi. Edellä mainitut näkökulmat ovat kyllä suunnitteluperusteita, mutta käytäntöön vieminen on jokaisen suunnittelijan omalla vastuulla. Nämä periaatteet kunnossapidettävyydestä viedään rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeeseen, mutta on lisäksi epäselvää, miten ohjeet viedään edelleen tehokkaasti osaksi käytännön ylläpitotoimia. [6]

2.2 Rakennusvalvonnan näkökulma pitkäaikaiskestävyyteen

Diplomityön yhteydessä selvitettiin rakennusvalvonnan näkökulmaa pitkäaikaiskestävyyden tarkasteluun rakennusvalvontaviranomaisille lähetetyssä kyselytutkimuksessa, johon vastasi 34 rakennusvalvonnan virkahenkilöä yhteensä 30:stä eri rakennusvalvontatahosta. Kyselyssä kartoitettiin rakennusvalvontaviranomaisten näkökulmaa säilyvyyden tarkastelun nykytilaan, sekä näkemyksiä pitkäaikaiskestävyydestä laadittavaan selvitykseen. Kyselyn vastauksia on eritelty tarkemmin diplomityön yhteydessä. [6]

Kyselyn perusteella pitkäaikaiskestävyyden ja säilyvyyden tarkastelun haasteena on, että kokonaiskuva ei hahmotu ja suunnittelijoilla ei ole riittävästi tietoa ratkaisujen toimivuudesta. Tavallisesti prioriteettina on mahdollisimman edullisesti asetetut minimivaatimukset täyttävä ratkaisu. Tavallisesti luotetaan niin sanottuihin perusratkaisuihin ja niiden toimivuuteen, mutta toisaalta useassa vastauksessa tunnistettiin myös riskikohtia hyvin yleisestikin käytössä olevissa ratkaisuissa. [6]

Rakennusvalvontaviranomaiset näkivät oman asemansa hankkeissa ohjaavana, ja prioriteettina suunnittelijan osaamisen varmistamisen. Selvitys pitkäaikaiskestävyydestä selkeällä pohjalla voisi auttaa hahmottamaan säilyvyyttä kokonaisuutena, jos selvitys on ytimekäs ja siinä nostetaan esiin erityisesti hankkeen haasteet ja riskikohdat. [6]

2.3 Rakennesuunnittelijoiden näkökulma pitkäaikaiskestävyyteen

Diplomityön yhteydessä haastateltiin viittä erilaisiin kohteisiin ja tehtäviin erikoistunutta kokenutta rakennesuunnittelijaa. Rakennesuunnittelijoiden näkökulmasta rungon suunnittelu säilyvyyden näkökulmasta onnistuu hyvin, mutta haasteet liittyvät detaljisuunnitteluun ja liittyviin materiaaleihin. Toistuva, yksinkertainen ja varma detailjiikka ja hyväksi todetut, tunnetut materiaalit nähtiin arvokkaana suunnittelussa ja myös rakennuksen käyttövaiheessa. [6]

Rakennesuunnittelijoiden yleinen näkökulma oli, että tietyt materiaalit, kuten vaippa ja pinnat,

ajatellaan vaihdettavaksi joka tapauksessa. Oli epäselvää, miten ylläpidettävyys huomioidaan suunnittelussa, vaikka se nähtiinkin yhtenä suunnitteluperusteena. Rakennesuunnittelijoiden haastatteluissa korostettiin myös huolellisen ja suunnitelmallisen ylläpidon merkitystä. Suunnittelu voi olla laadukasta, mutta ilman huolellista ylläpitoa rakennus ei säily käytössä. [6]

Rakennesuunnittelijoiden haastattelussa korostui myös se, että suunnittelijalle on taattava riittävät resurssit laadukkaaseen suunnitteluun. Tämä tarkoittaa sitä, että laadukkaasta suunnittelusta tulee olla mahdollista maksaa, ja että hankkeen eri osapuolten yhteistyötä tulisi entisestään kehittää. Selvitys rakennuksen pitkäaikaiskestävyydestä nähtiin mahdollisena lisätyönä suunnitteluprosessissa, mutta toisaalta se nähdään mahdollisuutena parantaa hankkeen sisäistä kommunikaatiota sekä mahdollisuutena tunnistaa hankkeen riskejä jo aikaisessa suunnitteluvaiheessa. [6]

3. Pohja rakennuksen pitkäaikaiskestävyyden tarkasteluun

Diplomityössä luotiin ja testattiin selvityspohja rakennuksen pitkäaikaiskestävyyden eli säilyvyyden tarkasteluun [6]. Selvityspohja rakennettiin Talo2000-luokittelun talo- ja tilaosien pohjalle, koska diplomityöstä rajattiin ulkopuolelle maarakentaminen ja talotekniikka [7].

Selvityspohjassa eritellään rungon suunniteltu käyttöikä ja suunnitteluperuste sekä seuraaville osille yleisrakenne/pääasiallinen rakennusmateriaali, suunniteltu käyttöikä, olosuhdeluokka ja erityiset riskit säilyvyyden näkökulmasta ja säilyvyyteen liittyvät lisätiedot. [6]

- 12 Talo-osat
 - 121 Perustukset
 - 122 Alapohjat
 - 123 Runko
 - 1231 Väestönsuojat
 - 1232 Kantavat seinät
 - 1233 Pilarit
 - 1234 Palkit
 - 1235 Välipohjat
 - 1236 Yläpohjat
 - 1237 Runkoportaat
 - 1238 Erityiset runkorakenteet
 - 124 Julkisivut
 - 1241 Ulkoseinät
 - 1242 Ikkunat
 - 1243 Ulko-ovet
 - 1244 Julkisivuvarusteet
 - 1245 Erityiset julkisivuvarusteet
 - 125 Ulkotasot
 - 126 Vesikatot
- 13 Tilaosat
 - 131 Tilan jako-osat
 - 132 Tilapinnat
 - 133 Tilavarusteet
 - 134 Muut tilaosat

- 135 Tilaelementit

Lisäksi selvityspohjassa eritellään käytettyjen lyhenteiden selitykset, muut riskit eli erityiset riskikohdat säilyvyyden näkökulmasta ja riskikohdan suunnitteluperusteet sekä pitkäaikaiskestävyyttä parantavat toimenpiteet eli erityisesti pitkäaikaiskestävyyden parantamista edesauttavat toimenpiteet. Erityisesti kohteessa tunnistettujen riskien erittely nähdään arvokkaana sekä rakennusvalvontaviranomaisen näkökulmasta että rakennesuunnittelijoiden näkökulmasta keskustelun herättäjänä. [6]

Selvityspohjaa testattiin diplomityön yhteydessä tavanomaiselle asuinkerrostalolle, ja todettiin pohja toimivaksi kohteen säilyvyyden tarkasteluun. Selvityksen avulla on mahdollista tunnistaa oleelliset säilyvyyteen liittyvät suunnitteluperusteet, riskikohdat ja erityisesti pitkäaikaiskestävyyttä parantavat toimenpiteet. On myös oletettavissa, että selvityksen avulla on mahdollista vertailla saman käyttötarkoitukseluokan rakennuksia ja pohjaa voidaan laajentaa koskemaan maarakennus- ja talotekniikkaosia. Lisäksi jatkossa on mahdollista tarkastella, miten pohjaa tulisi mukauttaa muiden käyttötarkoitukseluokkien rakennuksiin. Pohjan täyttäminen arvioidaan varsin nopeaksi tehtäväksi erityisesti silloin, kun toteuttajana on hankkeen pääsuunnittelija tai vastuullinen rakennesuunnittelija, jolla on käsitys hankkeen etenemisestä ja tehdyistä suunnitteluratkaisuista. [6]

Voidaan todeta, että selvitys pitkäaikaiskestävyydestä muodostaa hyvän pohjan käyttö- ja huolto-ohjeen muodostamiselle, ja voi toimia yhtenä sen osana. Lisäksi voidaan olettaa, että selvitys tukisi hankkeen sisäistä kommunikaatiota, koska erityiset riskikohdat ja niiden valintaperusteet voitaisiin käydä läpi koko hankeorganisaation kesken. Tämä toteutuu tosin ainoastaan silloin, jos selvitystä täytetään ajantasaisin suunnittelutiedoin hankkeen edetessä, ja ongelmakohdat havaittaisiin riittävän aikaisessa vaiheessa.

Jotta voitaisiin arvioida, missä kohteissa rakennuksen pitkäaikaiskestävyys ja säilyvyys on erityisen hyvin huomioitu, tulisi määritellä, mikä on tavanomaisen rakentamisen pitkäaikaiskestävyyden ja säilyvyyden taso, ja millä tämä tavanomainen taso voidaan ylittää [6]. Tavanomaisen ylittävälle tasolle voitaisiin asettaa esimerkkikriteerejä kuten 100 vuoden suunniteltu käyttöikä, rakennusosien teknisten käyttöikäen erittely ja arviointi minimitasoa laajemmin tai rakennosien vaihdettavuuden ja korjattavuuden maininta ja huomioiminen suunnitelmissa.

4. Yhteenveto

Perusmateriaalien (puu, betoni, teräs ja muuratut rakenteet) suunnitteluun erityisesti kantavien rakenteiden osalta on varsin hyvät ohjeet säilyvyyden näkökulmasta. Haasteita nousee esiin liittyvien rakenteiden ja materiaalien suunnittelussa, rasi- ja vaipparakenteissa, detalloikassa ja kokonaisuuden hahmottamisessa. Myös riittävien resurssien kohdistaminen laadukkaaseen suunnitteluun ja huolehtiminen rakennuksen kunnossapidosta on tärkeää säilyvyyden toteutumiseksi.

Selvitystyön tuloksena muotoiltiin selvityspohja rakennuksen pitkäaikaiskestävyydelle asuinkerrostalokohteeseen. Pohjan toimivuutta testattiin case-kohteella, ja se todettiin toimivaksi ja suhteellisen nopeaksi työkaluksi säilyvyysnäkökulmien tunnistamiseen.

Selvitys rakennuksen pitkäaikaiskestävyydestä voi toimia työkaluna, joka parantaa hankkeen kommunikaatiota, auttaa tunnistamaan riskejä ja rakennuksen toimivuutta kokonaisuutena sekä

toimii hyvänä pohjana rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeelle. Rakennuksia on mahdollista vertailla laadullisesti, ja selvitys tukee erityisten riskikohtien tunnistamista. Jatkossa tulisi laatia kriteerit rakennuksen säilyvyyden ”tavanomaiselle tasolle”, jotta rakennusten laadullinen arviointi tähän verraten olisi mahdollista.

Lähdeluettelo

- [1] Adams, K. et al. (2017). ”Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management 170.1, s. 15–24. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jwarm.16.00011> (viitattu 25.7.2023).
- [2] Antonini, E. et al. (2020). ”Reversibility and Durability as Potential Indicators for Circular Building Technologies”. en. Sustainability 12.18, s. 7659. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/18/7659> (viitattu 25.7.2023).
- [3] Häkkinen, T. ja Tarpio, J. (2021). ”Elinkaariominaisuudet rakentamisen ohjauksessa”. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 46/2021. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/337079> (viitattu 25.7.2023).
- [4] HE 139/2022 (2023). HE 139/2022 vp, Hallituksen esitys eduskunnalle rakentamislainsäädännön ja siihen liittyviksi laeiksi. Hallituksen esitys uudeksi rakentamislainsäädännöksi. URL: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/KasittelytiedotValtiopaivaasia/Sivut/HE_139+2022.aspx (viitattu 25.7.2023).
- [5] Häkkinen, T. (2023). Rakennesuunnittelijoiden kiertotalouskoulutus. verkkokurssi ja lähikoulutuspäivä 19.1.2023. Puhujana Tarja Häkkinen, Suomen ympäristökeskus SYKE.
- [6] Rintala, J. (2023). ”Selvitys rakennuksen pitkäaikaiskestävyydestä osana rakennuksen elinkaariominaisuuksia”. Diplomityö. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202304244166> (viitattu 25.7.2023).
- [7] RT 15-10956 (2009). ”RT 15-10956 piirustus- ja asiakirjaluettelo, Talo 2000”. RT-kortisto, Rakennustieto. URL: <https://rt.rakennustieto.fi/> (viitattu 25.7.2023).

Rakennusosien uudelleenkäyttö pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä

Jukka Lahdensivu¹ ja Tero Niemelä²

¹ Ramboll Finland Oy

² Skanska Talonrakennus Oy

Tiivistelmä

Ympäristöministeriö on asettamassa tavoitetasoja uudisrakennusten sallitulle enimmäishiilijalanjäljelle viimeistään vuonna 2025. Uudisrakentamisen hiilijalanjälkeä voidaan pienentää käyttämällä rakennusosia puretuista rakennuksista. Asuinkerrostaloissa suurin yksittäinen päästölähde on välipohjien ontelolaatat. Uudelleenkäytettävillä ontelolaatoilla rakennuksen hiilijalanjälki laskee noin 15 %. Väliseinien uudelleenkäyttöä hankaloittaa nykyinen 200 mm suurempi kerroskorkeus. Hallimaisissa rakennuksissa uudelleenkäytettäviä rakennusosia voivat yleisesti olla kaikki muut paitsi perustukset, paalut ja maanvastaiset alapohjat. Teollisuushalleissa rakennusosien uudelleenkäyttö pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä yli 50 %. Uudelleenkäytettävät rakennusosat ovat tyypillisesti runkoelementtejä ja olleet vuosikymmeniä kuivissa sisätiloissa, joten niiden tarpeetonta kastumista tulee välttää purkamisen, työmaakäsittelyn ja varastoinnin yhteydessä. Kosteuden hallintaan on siten kiinnitettävä erityistä huomiota. Puretun elementtirakennuksen varastointi vaatii huomattavasti tilaa, sillä elementtejä voi olla kaikkiaan yli tuhat.

1. Johdanto

Ympäristöministeriö on asettamassa tavoitetasoja uudisrakennusten sallitulle enimmäishiilijalanjäljelle viimeistään vuonna 2025. Ministeriön ohjeistuksessa hiilijalanjälki lasketaan 50 vuoden käyttöiälle ja tarkastelu tehdään erikseen rakennukseen sitoutuneelle hiilijalanjäljelle (embodied carbon) ja rakennuksen käytönaikaisen energiankulutuksen hiilijalanjäljelle (operational carbon). Tässä artikkelissa tarkastellaan elementtien uudelleenkäytön mahdollisuuksia rakennusmateriaaleihin sitoutuneen hiilijalanjäljen pienentämiseen sekä rakennusosien uudelleenkäyttöprosessia.

Rakennusosien uudelleenkäytöllä voi olla oleellista merkitystä uuden rakennuksen materiaaleihin sitoutuneeseen hiilijalanjälkeen. Ympäristöministeriön julkaiseman Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän [1] mukaan uudelleenkäytettävien rakennusosien hiilijalanjälki on 0 kgCO_{2e} (A1-A3) uudessa rakennuksessa. Rakennusosan irrottamisessa, käsittelyssä ja kuljetuksessa kuluu energiaa, minkä vuoksi uudelleenkäytettävällä rakennusosalla on kuitenkin jonkinlainen hiilijalanjälki. Saksalaisten tutkimusten mukaan uudelleenkäytettävien rakennusosien tuotevaiheen hiilijalanjälki on 2–5 prosenttia uuden vastaavan tuotteen hiilijalanjäljestä [2,3].

EU:n H2020-ohjelmasta rahoitettavassa ReCreate-hankkeessa tutkitaan betonielementtien uudelleenkäyttöä asuinkerrostalossa. Uudelleenkäyttöön kuuluu useita perinteisestä uudisrakentamisesta poikkeavia eri vaiheita rakenteellisesta kuntotutkimuksesta purkusuunnitteluun ja uusien liitosten suunnitteluun. Purku- ja uudelleenkäyttövaiheessa sekä varastoinnissa kosteudenhallinta on keskeisessä asemassa.

2. Inventointi ja tutkimukset

Ennen varsinaista purkusuunnittelua ja rakenteiden purkamista rakennukselle on suoritettava purkukartoitus, jossa mm. selvitetään purettavat rakenteet ja rakennusosien määrät. Tähän vaiheeseen on laadittu ohjeistusta mm. ympäristöministeriön toimesta [4]. Nykymuotoinen purkukartoitus on vapaaehtoinen ja rakenneosien uudelleenikäytön kannalta vajavainen. Purkukartoituksen yhteydessä tuleekin selvittää uudelleenikäytettävien rakenneosien ominaisuudet siinä laajuudessa, että niiden tietojen perusteella voidaan tehdä laskennalliset kantavuustarkastelut eurokoodin mukaisesti uudessa käyttötarkoituksessa.

Purettavien rakenteiden lujuus-, kestävyys- ja säilyvyysominaisuudet voidaan varmentaa rakenteellisella kuntotutkimuksella, jolla saadaan arvio rakenteen tutkimushetkenkunnosta sekä käytettyjen materiaalien ominaisuuksista. Kestävyys- ja lujuusominaisuuksien lisäksi on selvitettävä rakennuksessa mahdollisesti olevat asbesti- ja haitta-ainepitoisuudet. Lisäksi erilaisten liimojen tasoitteiden mahdolliset emissioriskit on suljettava pois ennen rakennusosien uudelleenkäyttöä.

Purkukartoitus, rakenteellinen kuntotutkimus sekä asbesti- ja haitta-aine- ja emissiotutkimukset tulee suorittaa hyvissä ajoin ennen rakennuksen suunniteltua purkamista, jotta purettavat rakennusosat löytävät sujuvasti tiensä uusiin rakennuskohteisiin. Tarvittavat tutkimukset tulisi mahdollisuuksien mukaan tehdä muutama vuosi ennen rakennuksen purkamista.

3. Purku ja varastointi

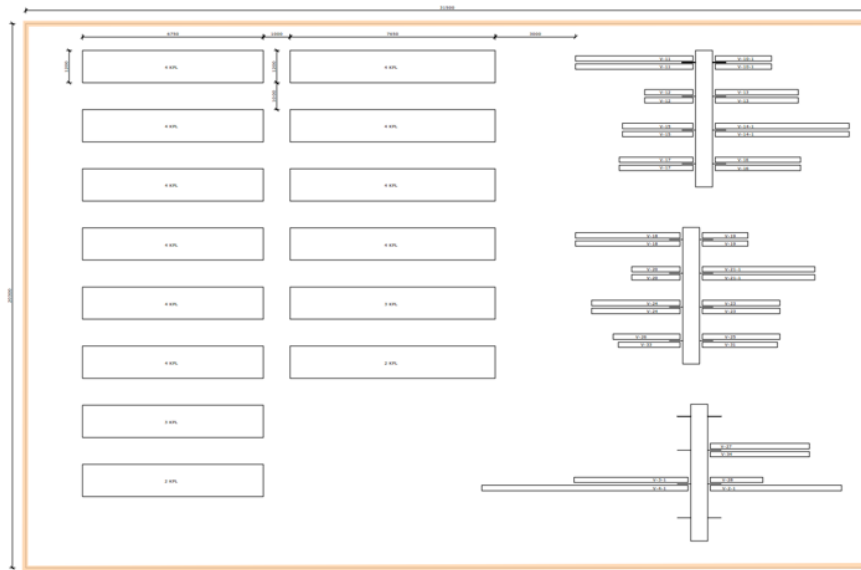
Rakennusosien purkusuunnittelu ja purkaminen ovat perinteisesti työturvallisuusorientoituneita vaiheita. Ehjänä purkaminen ja uudelleenikäytettävyys tuovat tähän oman lisähaasteensa, koska purkaminen vaatii enemmän työntekijöiden suorittamia nosto-osien kiinnityksiä sekä rakenteiden irrotusta ennen rakenteen nostamista pois paikoiltaan.

Purkutyö, rakennusosien käsittely työmaalla sekä varastointi ovat myös kosteudenhallinnan kannalta haasteellisia vaiheita. Uudisrakentamisessa betonielementteihin käytetystä vedestä osa sitoutuu kemiallisesti muodostaen betonin lujuutta sementin hydrataatiossa ja vain osa vedestä pitää kuivattaa haihduttamalla. Betonin tyypillinen hydrataatiossa tarvittava teoreettinen vesi-sementtisuhde on luokkaa 0,3, joten tyypillisellä 0,4–0,5 vesisementtisuhteella vain hydrataation ylittävä osuus vedestä pitää haihduttaa pois.

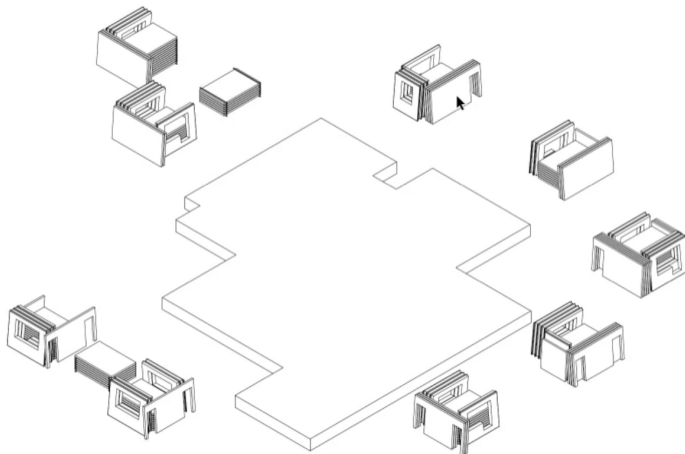
Vanhat runkoelementit ovat yleensä lämpimässä sisätilassa ennen purkua, joten betonin kosteus on tasapainokosteudessa ympäröivän ilman kosteuden kanssa. Kymmeniä vuosia esimerkiksi toimistotalon rungossa olleet betonirakenteet ovat siten hyvin kuivia. Rakennuksen purkaminen, elementtien käsittely työmaalla ja varastointi muuttavat tätä tasapainotilaa. Jos betonielementtien annetaan kastua työmaa- ja varastointivaiheessa, kaikki betoniin kapillaarisesti imeytynyt kosteus pitää haihduttaa pois. Kosteutta ei enää sitoudu kemiallisesti. Tästä syystä uudelleenikäytettävien elementtien kosteudenhallintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota tarpeettoman kastumisen välttämiseksi. Toinen merkittävä syy elementtien sääsuojaukseen on Suomen talvessa esiintyvät jäätymissulamissyklit. Sisätiloihin tarkoitettujen elementtien betoni ei ole lisähuokoistettua, joten ne eivät ole pakkasenkestäviä kosteusrasituksessa eikä näitä elementtejä (niin uusia kuin uudelleenikäytettäviä) pidä säilyttää pitkiä aikoja ulkona.

Elementtien varastointi vaatii huomattavan paljon tilaa, sillä tavanomaisessa 1970-luvun 5-kerroksissa kolmerappuisessa asuinkerrostalossa on tyypillisesti noin 1200 elementtiä. Kuvassa 1

on layout-suunnitelma sääsuojatarpeesta, johon on sijoitettu 150 m² varastorakennusta varten irrotetut ontelolaatta- ja väliseinäelementit. Sääsuojan koko on 30 m x 31,5 m.



Kuva 1. Ontelo- ja väliseinäelementtien varastointi suunnitelma. (Kuva Ramboll Finland Oy)



Kuva 2. Uudelleenkäytettävien elementtien varastointisuunnitelma Saksasta. (kuva ReCreate-hanke).

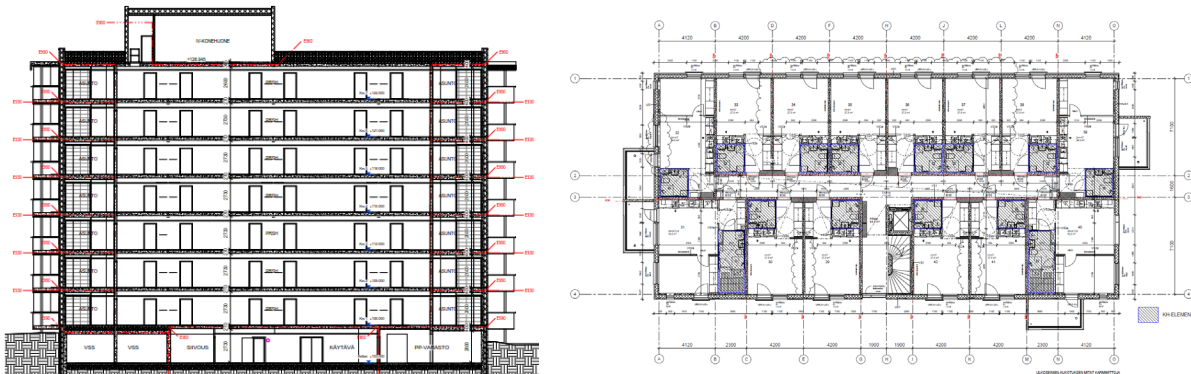
ReCreate-hankkeen muissa pilotoivissa maissa Ruotsissa, Alankomaissa ja Saksassa uudelleenkäytettävien rakennusosien varastointi tapahtuu ilman sääsuojausta joko erillisellä varastoalueella tai uuden rakennuskohteen tontilla, ks. kuva 2.

4. Vaikutukset hiilijalanjälkeen

Betonirakenteisessa asuinkerrostalossa rakennuksen rungon hiilijalanjälki on tyypillisesti noin 60 prosenttia koko rakennuksen hiilijalanjäljestä. Julkisivut ja parvekkeet mukaan lukien osuus on noin 80 prosenttia. [5] Rakenteista hiilijalanjäljen kannalta merkittävimpiä ovat välipohjat, kantavat väliseinät sekä yläpohja. Tällä hetkellä markkinoilla olevilla vähähiilisillä betonituotteilla tyypillisen asuinkerrostalon hiilijalanjälki pienenee noin 25 prosenttia [6].

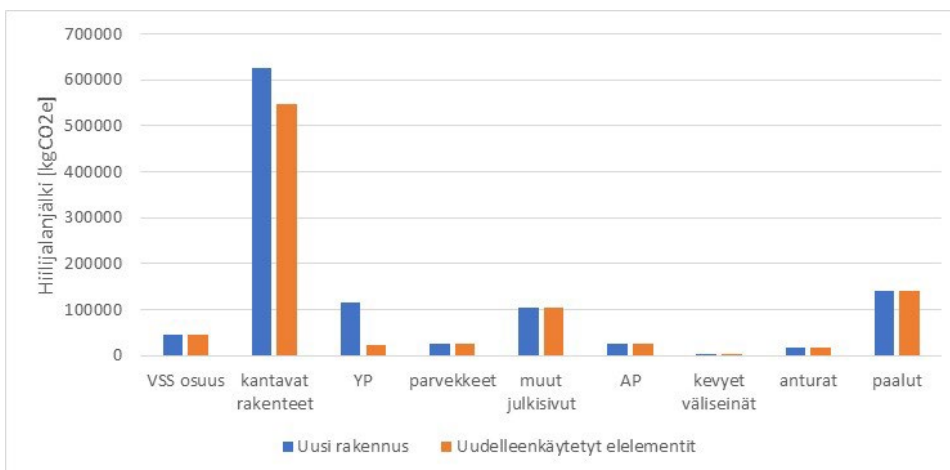
4.1 Asuinkerrostalo

Kuvan 3 betonielementtirakenteisen uuden asuinkerrostalon hiilijalanjäljen laskentaa on käsitelty perusteellisesti lähteessä [7]. Betonielementtikerrostaloon sitoutunut hiilijalanjälki on 1105751 kgCO₂e. Välipohjaan (VP1) on sitoutunut kokonaismäärällisesti eniten hiilijalanjälkeä 355465 kgCO₂e. Kokonaisuuden kannalta toiseksi suurin hiilijalanjälki aiheutuu paaluista (141820 kgCO₂e). Kolmanneksi suurin hiilijalanjälki aiheutuu kantavista betoniväliseinistä (140636 kgCO₂e) lähes yhtä suurella lukemalla kuin paalut. Yläpohjasta (YP1) aiheutuu vasta neljänneksi suurin hiilijalanjälki (115231 kgCO₂e).



Kuva 3. Esimerkkirakennuksen leikkaus- ja pohjapiirustus [7].

Uuden elementtirakennuksen välipohjan ontelolaatat voidaan korvata vanhasta purettavasta rakennuksesta irrotettavilla ontelolaatoilla suhteellisen helposti. Väliseinät ovat nykymitoitukseen nähden 200 mm liian lyhyitä, joten uudelleenkäyttö on niiden osalta hankalaa. Sen sijaan yläpohja voidaan käyttää kevytsoraeristeinen uudelleen ja vain vesikate uusitaan.

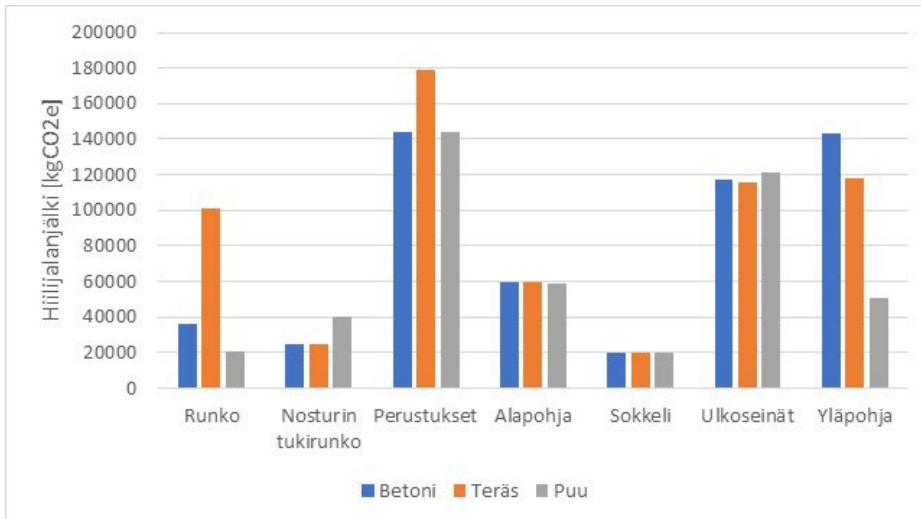


Kuva 4. Rakennukseen sitoutunut hiilijalanjälki perustapauksessa ja uudelleenkäytetyillä ontelolaatoilla ja yläpohjaeristeillä toteutettuna.

Kuvassa 4 on esitetty hiilijalanjäljen jakautuminen eri rakennusosiin perustapauksessa ja ontelolaattojen sekä yläpohjan lämmöneristeiden uudelleenkäytössä. Rakennuksen kokonaishiilijalanjälki pienenee noin 15 %, kun uudelleenkäytettyjen rakennusosien hiilijalanjäljeksi oletetaan saksalaisten tutkimusten mukainen 5 % osuus uuden rakennusosan valmistamisesta (A1-A3).

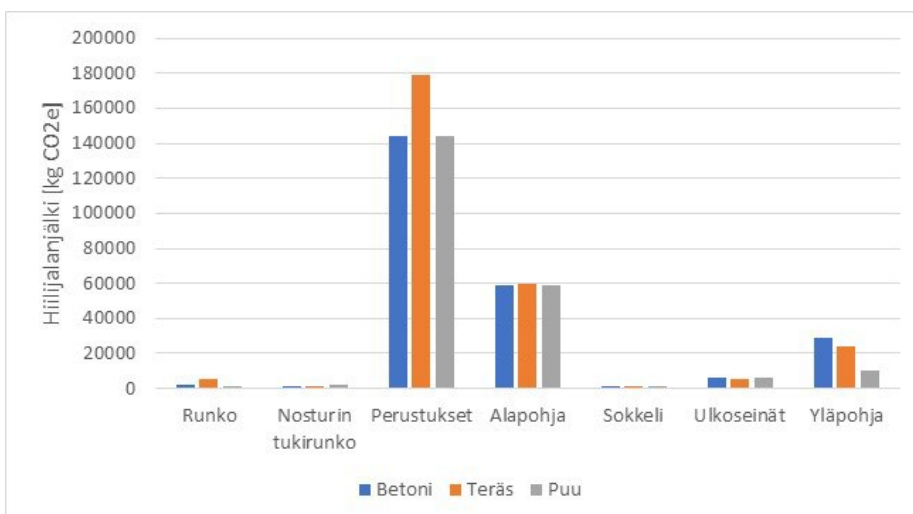
4.2 Teollisuushalli

Hallimaisissa rakennuksissa hiilijalanjälki jakautuu eri rakennusosille eri tavoin kuin asuinkerrostaloissa. Rakennuksen rungon osuus sitoutuneista kasvihuonepäästöistä on huomattavasti pienempi kuin asuinkerrostaloissa. Hiilijalanjälki muodostuu suuremmilta osin perustuksista (riippuu pohjaolosuhteista), ulkoseinistä sekä yläpohjasta. Hankesuunnitteluvaiheen hiilijalanjälkitarkastelussa tuhannen neliömetrin betonirunkoisessa hallissa hiilijalanjälki on 544487 kgCO_{2e}, teräsrunkoisessa 618361 kgCO_{2e} ja puurunkoisessa 456242 kgCO_{2e}. Hiilijalanjäljen jakautuminen eri rakennusosille on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Hiilijalanjäljen jakautuminen eri rakennusosille betoni-, teräs- ja puurunkoisessa nosturiradallisessa teollisuushallissa, perustapaus.

Purettaessa esimerkin hallirakennuksen uudelleenkäytettäviä rakennusosia ovat kaikki muut paitsi perustukset, maata vasten valettu alapohja sekä yläpohjan vesikatteen (bitumikermi) osuus. Puretuista osista samanlaisena uudelleenkoottavan hallin hiilijalanjälki on siten yli puolet pienempi kuin kokonaan uusista rakennusosista koottu halli. Hiilijalanjäljen jakautuminen eri rakennusosille on esitetty kuvassa 6. Rakennusosien uudelleenkäyttö pienentää betoni- ja teräsrunkoisen hallin hiilijalanjälkeä 55 prosenttia ja puurunkoisen 51 prosenttia.



Kuva 6. Hiilijalanjäljen jakautuminen eri rakennusosille betoni-, teräs- ja puurunkoisessa nosturiradallisessa teollisuushallissa uudelleenkäytetyillä rakennusosilla.

5. Yhteenveto

Ympäristöministeriö ohjaa uudisrakentamista ympäristöystävällisempään suuntaan mm. asettamalla tavoitetasoja rakennusten enimmäishiilijalanjäljelle viimeistään vuonna 2025. Rakennusosien uudelleenkäytöllä on mahdollista pienentää rakennuksiin sitoutunutta hiilijalanjälkeä ja samalla vähentää neitseellisten materiaalien käyttöä rakentamisessa.

Asuinkerrostalossa välipohjiin, väliseiniin ja yläpohjaan on sitoutunut eniten materiaalia ja siten niillä on myös korkein hiilijalanjälki. Väli- ja yläpohjarakenteiden korvaaminen uudelleenkäytettävillä rakennusosilla pienentää koko rakennuksen hiilijalanjälkeä noin 15 %. Vanhojen väliseiniin uudelleenkäyttö on hankalaa, koska kerroskorkeus on nykyisin 200 mm korkeampi kuin tyypillisissä purettavissa asuinkerrostaloissa.

Teollisuushalleissa rakennusosien uudelleenkäyttö on monella tapaa helpompaa ja tehokkaampaa kuin asuinkerrostaloissa. liitokset ovat helpommin avattavissa ja elementit uudelleenkäytettävissä. Halleissa rakennusosien uudelleenkäyttö pienentää hiilijalanjälkeä 51–55 % runkomateriaalista riippuen.

Rakennusosien uudelleenkäytöstä aiheutuu muutoksia purkamisesta varastointiin ja työmaatoimintoihin. Jokaisessa vaiheessa kosteudenhallinta on keskeisessä osassa. Kuivia purettuja rakennusosia ei tule tarpeettomasti kastella missään vaiheessa, sillä rakennusosien kuivaaminen kuluttaa energiaa.

Lähdeluettelo

- [1] Kuittinen, M. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. 54 s.
- [2] Asam, C. 2006. Recycling prefabricated building components for future generations. IEMB Info 1/2006. Berlin. Institute for Preservation and Modernisation of Buildings at the TU Berlin.
- [3] Mettke, A. 2015. Beispiele für Wieder- / Weiterverwendungsmaßnahmen unter Verwendung gebrauchter betonbauteile. 4 p.
- [4] Wahlstöm, M., Hradil, P., Teittinen, T., Lehtonen, K. 2019. Purkukartoitus – opas laatijalle. Helsinki. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:30. 33 s.
- [5] Lahdensivu, E. 2019. Hiilijalanjäljen arviointi aikaisessa suunnittelussa ja siihen vaikuttaminen. Kandidaatintutkimus. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. 21 s.
- [6] Lahdensivu, J. 2022. Vähähiilisen betonin mahdollisuudet asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentämisessä. *Betoni* 3/2022. s. 84-89.
- [7] Lahdensivu, J. 2021. Asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentäminen betoniteknologian keinoin. In Vinha, J., Raunima, T. (editors) *Rakennusfysiikka 2021 – seminaari*. Tampere. s. 241-246.

Purettavaksi suunnittelun arviointi kantaville puurakenteille

Sonja Laasonen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Purettavaksi suunnittelu on noussut rakennusosalalla esille uuden rakentamislain myötä. Purettavaksi suunnittelulla pyritään edistämään rakennuksen elinkaariominaisuuksia ja rakenteiden uudelleenkäyttöä jo suunnitteluvaiheessa. Purettavaksi suunnittelusta laadittiin kirjallisuustutkimus, ja lähdeaineistona käytettiin yleistä alan kirjallisuutta ja puurakentamisesta toteutettuja tutkimuksia. Kirjallisuustutkimuksen pohjalta muodostettiin viisi kriteeriä, jotka ensisijaisesti tulisi huomioida purettavaksi suunnittelussa. Kriteerit ovat: helppo pääsy rakenneosiin, purkamisen helppous, itsenäisyys, yksinkertaisuus ja vakiointi. Helpolla pääsyllä rakenneosiin otetaan huomioon liitokseen pääsy, purkamisen helppoudella tutkitaan liitostekniikan soveltuvuutta purkamiseen, itsenäisyydellä otetaan huomioon muiden rakenteiden vaikutus purkamiseen, yksinkertaisuudella arvioidaan liitosjärjestelmän selkeyttä ja vakioinnilla huomioidaan jatkokäyttöön mahdollisesti tarvittavia toimenpiteitä. Kriteerien tarkoituksena on ohjata purettavaksi suunnittelua ja esittää dokumentoitavia asioita rakennesuunnittelusta, jotta rakennuksen purkuvaiheessa purettavaksi suunnittelu voidaan hyödyntää, ja tieto rakenteiden irrotettavuudesta säilyy.

1. Johdanto

Ympäristöön liittyviä ongelmia, kuten ilmastokriisiä, hupenevia luonnonvaroja ja luontokatoa on pyrittävä hillitsemään. Rakennusosalalla merkitys korostuu, sillä rakennusalan päästöt kattavat 30 % Suomen päästöistä, ja näistä rakennusmateriaalien osuus on noin 15 % [1]. Näitä tavoitteita pyritään edistämään 1.1.2025 voimaan astuvalla rakentamislalla, sillä laki nostaa esille rakennuksen elinkaariominaisuudet, joissa purettavuus on esitetty yhtenä rakennuksen elinkaariominaisuudet mahdollistavana ominaisuutena. Purettavuus määritellään rakenneratkaisuksi, jolla mahdollistetaan rakennusosien ja materiaalien irrottaminen ehjänä niin, että edellytykset näiden hyödyntämiselle olisivat hyvät. [2]

Purettavuudella voitaisiin edistää purkujätteiden arvokkaampaa käsittelyä. Esimerkiksi vuosien 2018–2020 aikana keskimäärin kaikesta puujätteestä 95 % meni energiana hyödyntämiseen [3], mikä ei ole jätehierarkian mukaista arvokkainta hyödyntämistä. Jätehierarkiassa pyritään ensisijaisesti vähentämään jätteen määrää, toissijaisesti suositaan uudelleenkäyttöä tai uusiokäyttöä, tämän jälkeen tulee energiana hyödyntäminen ja viimeisenä vaihtoehtona loppusijoitus kaatopaikalle [4].

Purettavaksi suunnittelua on tutkittu muun muassa Tampereen teknillisessä yliopistossa, jossa on tehty laaja esiselvitys puurakenteiden uudelleenkäyttömahdollisuuksista. Esiselvityksessä todetaan, että ainakin liimapuu-, viilupuu- ja massiivipuulevyrakenteet ovat soveltuvia purettavaksi. Selvityksessä todettiin liitoksen tärkeys rakenteellisten ominaisuuksien, kuten lujuuden, säilymisessä. Uudelleenkäytettävän rakenteen liitos tulisi säilyttää tai rakenne lyhentää, jotta voidaan luoda uusi samanlainen liitos rakenteeseen. [5]

Esiselvityksen pohjalta tehtiin tutkimus kantavien liimapuurakenteiden ja CLT-massiivipuuelementtien liitoksien purettavuuden arvioinnista. Työssä keskityttiin

nykyrakennuskulttuuriin eikä otettu kantaa rakenteiden mahdollisiin hyödyntämistapoihin. Purettavuuden arvioinnissa lähtökohtana oli säilyttää rakenteen kantavuusominaisuudet eikä rakenteen muihin ominaisuuksiin, kuten paloteknisiin ominaisuuksiin, otettu kantaa. [6]

2. Purettavaksi suunnittelun toteutus

2.1 Purettavuuden edellytykset

Purettavaksi suunnittelulla pyritään edistämään rakenteiden uudelleenkäyttöä mahdollistamalla rakenteiden kustannustehokas irrotettavuus, niin että rakenteen kantavuuden ominaisuudet säilyvät. Jotta uudelleenkäyttö olisi ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta järkevää, on uudelleenkäytön vähennettävä rakennusmateriaaleihin kuluva hiilidioksidipäästömäärää verrattuna neitseellisen materiaalin käyttöön, joten uudelleenkäyttö on toteuttava kiertotalousmallien mukaisesti mahdollisimman pienillä muokkaustarpeilla. [6]

Lainsäädäntöön vaaditaan ohjeistusta uudelleenkäytettävien tuotteiden hyväksyttämiseksi ja kelpoisuuden osoittamiselle, jotta uuden rakentamislain momentin 39 elinkaariominaisuuksista purettavuus ja uudelleenkäytettävyys voisi toteutua. Esimerkkinä kelpoisuuden osoittamisesta nykyinen CE-merkintä koskee vain uusia tuotteita [7]. Kelpoisuuden osoittaminen edellyttää rakenteen kunnan määrittämistä, johon ei tällä hetkellä ole vakiintunutta käytäntöä. Mikäli prosessin toimivuus toisi purkujätteelle markkinat, ei se olisi enää lain määritelmän mukaan jätettä [8].

2.2 Arviointikriteerit

Purettavuuden arviointikriteerit muodostettiin referenssikirjallisuuden perusteella. Yhtenä referenssinä käytettiin standardia ISO 20887, jossa esitetään purettavuuden periaatteita. Kyseisestä standardista ei ole Euroopassa vastaavaa eurokoodia tai muuta ohjeistusta, joten tämä standardi oli pohjana purettavaksi suunnittelussa käytettäviin arviointikriteereihin. Standardin lisäksi tutkittiin viisi tutkimusta aiheeseen liittyen, ja vertailtiin tutkimuksien kriteerejä standardin kanssa. Erilaisia kriteerejä nousi paljon esille, mutta ne voitiin jakaa aihepiireittäin isompiin kokonaisuuksiin. Taulukossa 1 on esitetty purettavaksi suunnittelun arviointiin soveltuvat kriteerit. [6]

Taulukko 1. Purettavaksi suunnittelun arviointikriteerit. [6]

Periaatteet:	Selite:	Tarkoitus:	Käyttötarkoitus tämän työn arvioinnissa:
1. Helppo pääsy rakenneosiin	Rakennekerroksien selkeys, eroteltavissa eri käyttöön omaavat osat	Korjattavuus ilman ympäröivien osien vahingoittamista, näkyvät liitokset, työstötilan huomioiminen, yksinkertaiset työvaiheet toimenpiteen suorittamiseksi	Arvioidaan liitoksen pääsy, työvaiheiden määrää ja työskentelytilaa
2. Purkamisen helppous	Arvioidaan toimenpiteitä purkamisen aikana	Ottaa huomioon ammattitaidon vaatimuksen, työkalujen erityisyys ja tarvittavat suojavarusteet	Arvioidaan liitoksen irrotettavuutta: työtapa, määrää ja työkaluja sekä tilaa näiden toteuttamiseen
3. Itsenäisyys	Tietyn osan poistaminen ilman vaikutusta muihin rakenteisiin	Materiaalien erottelu, liitostyypit soveltuvia irrottamiseen/muokkaamiseen	Arvioidaan ympäröivien rakenteiden vaikutusta purkuun ja liitososien erottuvuutta

4. Yksinkertaisuus	Ymmärrettävää ja suoraviivaista suunnittelua	Vähän eri materiaaleja ja elementtejä, vältetään koristeellisuutta	Arvioidaan eri liitososien määrää, tunnistettavuutta ja löytämistä rakenteista
5. Vakiointi	Tuotteella/komponenteilla/prosesseilla tietyt vaatimukset	Selkeät toimintatavat työvaiheisiin, kuljetukseen, säilytykseen ja uudelleenkäyttöön, yhtäläiset ominaisuudet, selkeyttää tulevaisuuden mahdollisuuksia	Arvioidaan saman liitososan toimivuutta uudelleenliitintään varten, huomioiden helppous löytää liitospari ja tehdä yhteensovitus

Arvioitavat ominaisuudet tulevat lähteistä saatavien kriteerien selityksien sekä tutkimuksissa käytettyjen arviointien perusteella. On hyvä huomata, että taulukossa 1 olevien kriteerien 1 ja 2 ero on, että ensimmäisellä kriteerillä arvioidaan itse liitokseen pääsyä ja toisella kriteerillä huomioidaan taas liitosrakenteen purettavuutta.

Taulukosta 1 on jätetty pois kriteerejä, joita lähdekirjallisuudessa esitettiin. Nämä kriteerit esiintyivät vain yksittäisissä julkaisuissa tai kriteereitä ei koettu merkittäväksi kantavien puorakenteiden arvioinnissa.

Poisjääneistä kriteereistä lujuus on yksi edellytys uudelleenkäyttöä ajatellen, jolloin suunnitteluratkaisulla, jotka varmistavat rakenteen säilyvyyden, edistetään myös lujuuden säilymistä. Paino voitaisiin liittää helppoon purkamiseen, mutta keveydestä saatavat hyödyt liittyvät materiaalivalintoihin, joten liitossuunnittelulla ei pystytä tuomaan merkittäviä painoetuja. Kustannukset ovat edellytys koko uudelleenkäyttöprosessin etenemiselle ja purettavaksi suunnittelu tekee rakenteesta teknisesti purettavamman, mikä voi vaikuttaa purkuvaiheen kustannuksiin ja edesauttaa kiertotalouden talousmallin mahdollistamista. Muokkaustarpeiden välttäminen kattaa teknisesti turhien toimintojen tekemisen rakenteille, mikä on kantavien rakenteiden kohdalla harvinaista, joten sitä ei arvioida. Turvallinen purkaminen käsittää suunnitteluratkaisuiden dokumentointia, eikä tässä työssä esitetä esimerkkidokumentaatiota.

2.3 Liitoksien arviointi

Kriteeristöä testattiin tyypillisille liimapuu- ja CLT-rakenteille. Purettavuuden arviointi toteutettiin subjektiivisella arvioinnilla numeroasteikolla yhdestä neljään ottaen kantaa siihen, toteutuuko kriteeri huonosti (1) vain hyvin (4). Tutkimuksessa käsiteltiin useita liitostyyppisiä, tässä artikkelissa esitetään kaksi esimerkkitapaa arvioida tyypillisten liimapuu- ja CLT-liitoksien purettavuutta. Arvioinnissa käytettiin oletusta, että rakennus puretaan kokonaan, jolloin kantavat ja jäykistävät rakenteet voidaan purkaa viimeisenä. Liitoksen osiksi luokiteltiin kaikki komponentit, joilla on rakenteellista merkitystä.

Liimapurakenteilla pääkannatin ja pilari voidaan kiinnittää toisiinsa hankolautaliitoksella. Liitoksen tarkoituksena on siirtää kuormia perustuksille ja jäykistää vaakakuormia ja pääkannattimen kiepahdusta vastaan. Hankolautaliitoksen liitososia ovat hankolauta, puikkoliittimet, kierretangot ja teräslevy.

Hankolautaa ei voida irrottaa ehjänä pilarista rakenteiden välisen liimauksen takia. Mikäli työmaalla riittää irrottaa hankolauta vain pääkannattimesta on rakenteiden ehjänä säilyminen todennäköisempää. Myös kierretangot ja teräslevy on asennettu tehtaalla, joten niiden on suotavaa jäädä rakenteeseen kiinni. Taulukossa 2 on esitetty purettavuuden arviointi.

Taulukko 2. Pääkannattimen ja pilarin välisen liitoksen purettavuuden arviointi. [6]

Periaatteet:	Pisteet:	Perustelut:
1. Helppo pääsy rakenneosiin	3	- peittäviä suojarakenteita ei ole nähtävillä
2. Purkamisen helppous	2	- palosuojarakenteessa eri ruuvit kuin hankolaudassa, vaatinee enemmän työkaluja - purettava vain pääkannattimen ruuvit -> voiko epähuomioissa luulla muitakin kiinnikkeitä irti otettavaksi (paljon liittimiä)
3. Itsenäisyys	3	- massiivirakenne helppo erottaa - pääkannattimessa olevat muut rakenteet irrotettava ennen tämän purkua
4. Yksinkertaisuus	2	- paljon irrotettavia ruuveja - myös paljon ei irrotettavia ruuveja "hämäämässä"
5. Vakiointi	3	- samanlainen liitos voidaan rakentaa, mikäli reunaetäisyydet sallivat isommat ruuvit tai liitoksen rakentamisen eri kohtaan

Toinen arvioitava esimerkkiliitos on CLT-elementtinen ulkoseinä ponttiliitoksella. Kyseinen liitos estää elementtirakenteita irtoamasta toisistaan ja välittää sekä leikkaus- että normaalivoimaa. Ponttiliitoksen liitososia ovat ruuvit, saumanauha ja elastinen tiivistemassa. Liitoksen edessä on höyrynsulkuteippaus ja lämmöneriste. Ruuvien irrotettavuus on parempi kuin naulan, kunhan ruuvien kanta on ehjä. Purettavuuden arviointi ponttiliitokselle on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ponttiliitoksen purettavuuden arviointi. [6]

Periaatteet:	Pisteet:	Perustelut:
1. Helppo pääsy rakenneosiin	3	- purkua voi hankaloittaa päällä olevat rakenteet -> poistettava ennen purkua
2. Purkamisen helppous	3	- ruuviliitos
3. Itsenäisyys	3	- seinäelementit kiinnittyvät toisiinsa, joten tuennan tarpeen arviointi tehtävä purun yhteydessä
4. Yksinkertaisuus	2	- liitososia paljon, joten yksittäisen ruuvien unohtaminen paikoilleen voi vaurioittaa rakenteita
5. Vakiointi	3	- samankokoisilla ponttien loveuksilla helppo kiinnittää toisiinsa - reikään voi kiinnittää isomman ruuvien, mikäli reunaetäisyydet sallivat sen

2.4 Analysointi

Käytetty arviointimenetelmä tuo vertailumahdollisuuden saman kriteerin toteutumiselle eri liitoksilla. Arviointimenetelmällä ei kuitenkaan voida laskea keskiarvoa rakenteiden purettavuudelle, koska pisteytyksessä ei ole huomioitu kriteerien painotuksia. Mikäli kaksi ensimmäistä kriteeriä, helppo pääsy rakenneosiin ja purkamisen helppous, saavat arvon yksi, eli näiden toteuttamiselle on erittäin huonot edellytykset, todennäköisesti koko ehjänä purkamisen ei onnistu, vaikka loput kriteeriestä saisivatkin arvon 4.

Puurakenteissa yleisimmät purettavuuteen vaikuttavat ominaisuudet ovat yksinkertainen liitostekniikka, käytetyt puikkoliittimet ja kiinnityspisteiden määrä rakenteessa. Nämä huomiot keskittyvät puurakentamisen pariin, mutta tästä voidaan yleistää, että liitososiin ja liitoskohtien määrään ja yksinkertaisuuteen on huomioitava purettavaksi suunnittelussa. Myös kriteeristön luonnissa on puurakentamisen lisäksi käytetty standardia ISO 20887 ja yleisempiä tutkimuksia. Täten taulukossa 1 esitettyä kriteeristön toimivuutta olisi mahdollista testata myös betoni- ja teräsrakenteille.

Uudelleenkäyttöä edistävä toimi on esimerkiksi tiedonsiirto rakennuksen purkuvaiheessa, jotta ehjänä irrottamiseen soveltuvat rakenteet on helpompi tunnistaa. Tätä tulisi edistää dokumentoimalla rakennesuunnittelussa tehtyjä ratkaisuja, joissa purettavuus on myös huomioitu. Taulukossa 1 esitetyt kriteerit ovat purettavuutta edistäviä toimia.

Vaurionsietokykyä tai lujuusominaisuuksia ei tuoda esille arvioinnissa, vaikka ne ovat ehtona ehjänä purkamisen toteutukselle. Suurilla rakenteilla on parempi vaurionsietokyky [9], joten kantavilla rakenteilla on hyvä edellytys ehjänä säilymiselle.

Purkutapa saattaa vaikuttaa arvioinnin lopputulokseen. Purkuvaiheen lopullinen toteutus voi muuttaa purettavaksi suunnittelun lähtökohtia. Toivottavaa kuitenkin on, että purettavaksi suunnittelu toisi kustannustehokkaampia vaihtoehtoja ehjänä purkamiselle ja auttaisi purkusuunnitelman laatimisessa.

Työn arviointi tarkastelee vain liitosrakenteita, mikä on pieni osa koko rakennusjärjestelmää. Muissa tutkimuksissa [6] purettavuutta käsiteltiin liitostekniikan kautta, joten voidaan todeta, että menettely on lähtökohta koko purettavaksi suunnittelulle.

3. Yhteenveto

Purettavaksi suunnittelulla pyritään edistämään uudelleenkäyttöä ja muita rakennuksen elinkaariominaisuuksia, jotka lisäävät rakennusosien käyttöikä. Tavoitteena on vähentää neitseellisen materiaalin tarvetta ja rakennusalan päästöjä. Lisäksi purettavaksi suunnittelun on tarkoitus tehdä rakenteista teknisesti purettavia, jotta prosessi olisi kustannustehokasta.

Tässä työssä selvitettiin purettavaksi suunnittelun arviointikeinoja. Lähdekirjallisuuden avulla luotiin viisi kriteeriä rakenteiden purettavuuden arviointiin. Kriteereille esitettiin selventävä selitys ja mahdollisia soveltamiskeinoja arviointia ajatellen. Kriteeristö keskittyy liitosrakenteiden arviointiin, sillä se on lähtökohta purettavaksi suunnittelulle. Arviointi ei esitä parasta mahdollista liitosratkaisua vaan antaa kuvaa tämänhetkisten rakenneratkaisuiden soveltuvuudesta purettavaksi suunniteltavaksi. Arvioinnin pohjalta voidaan todeta, että liimapuuliitoksilla purettavuuden arvioinnissa yksinkertaisuus ja vakioidut ratkaisut toteutuvat hyvin. CLT-liitoksissa liitoskohtien määrä voi hankaloittaa purettavuutta. Yleisesti liitosrakennetta tulisi päästä työstämään ja liitoksessa on vältettävä kemiallisia liitoksia, kuten jälkivalua. Vähäinen liitososien ja -kohtien määrä edistää purettavuutta.

Jatkossa kriteeristön toimivuutta tulisi testata laajemmin koko rakennusalalla, laajempien esimerkkien luomiseksi. Käytännön kokeet toisivat varmennusta ja tarkennusta kriteerien toimivuuteen. Yksiselitteisempää arviointia purettavuudesta voisi edistää painotuksien määrittely kriteereille, eli tuoda esille, mitkä kriteerit ovat ehdottomia ehjänä purkamisen kannalta. Uudelleenkäytön prosesseja on rakennusalalla kehitettävä tulevaisuudessa ja purettavaksi suunnittelu on yksi askel kehitystyötä.

Lähdeluettelo

- [1] Raivio T., Laine A., Klimscheffskij M., Heino A., Lehtomäki J. (2020), Vähähiilinen rakenneteollisuus 2035 Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020–2035-2050 Lopullinen versio, Rakennusteollisuus, saatavilla: https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyiden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf
- [2] HE 139/2022 vp, Hallituksen esitys eduskunnalle rakentamislainsiksi ja siihen liittyviksi lakeiksi, saatavissa: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/KasittelytiedotValtiopaivaasia/Sivut/HE_139+2022.aspx
- [3] Tilastokeskus (2022), Vuoden 2020 jätekertymä pysyi lähes ennallaan edellisvuodesta – syynä kaivannaisjätteiden ja teollisuuden jätteiden määrän vähäiset muutokset, saatavilla: <https://www.stat.fi/julkaisu/cktwkbch43uld0b55tv7g9oup>
- [4] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EV jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta, saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=IT>
- [5] Huuhka S., Köliö A., Annila P. & Poti A., (2020), Puurakenteiden uudelleenkäyttö, Tutkimusraportti
- [6] Laasonen S. (2023), Purettavaksi suunnittelu kantaville puuelementeille, Diplomityö, saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202305045274>
- [7] Zhu Y. & Tähtinen K. (2022), Rakenneosien uudelleenkäytön edellytykset Suomessa, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, saatavilla: <https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=41601>
- [8] 646/1999, Jätelaki, Finlex, saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646#L2P11a>
- [9] Webster M. D., Simpson G & H., Costello D. T., Costello Dismantling CO., Designing structural systems for deconstruction: How to Extend a New Building’s Useful Life and Prevent it from Going to Waste When the End Finally Comes, GA, saatavilla: <http://lifecyclebuilding.org/resources.php>

Yhteistyöllä taklaamaan kiertotalouden haasteita

Elina Yli-Luukko¹, Timo Kauppinen¹, Markku Hienonen² ja Olli Teriö³

¹ Pohjois-Suomen Rakennusklusteri ry

² Rakennustarkastusyhdystys ry

³ Oulun Yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Tiivistelmä

Pohjois-Suomen rakennusklusteri on kolmikantaklusteri yhdistäen rakennusalan yritykset, oppilaitokset sekä viranomaiset. Kolmikantaisuus tekee siitä laajapohjaisen keskittymän rakentamistoimialaa eteenpäin ajavana yhteisönä. Pohjois-Suomen Rakennusklusteri on tehnyt yhteistyötä Kiertotalousklusterin kanssa sekä osallistunut aiheeseen kuuluviin tapahtumiin että järjestämällä niitä itse. Tässä esityksessä esitetään rakennusmateriaalien ja kiertotalouden reunaehdot, tarvittavia toimenpiteitä ja onnistumisen edellytyksiä Pohjois-Suomen Rakennusklusterin eli elinkeinoelämän, viranomaisvalvonnan ja tutkimuksen vuorovaikutukseen perustuen.

1. Johdanto

Kiertotalouden merkitys tulee merkittävästi kasvamaan jo pelkästään EU:n ja YM:n tavoitteiden johdosta, taustalla on maapallon resurssien riittämättömyys ja hiilijalanjäljen pienentämisen pakko. Tietoa esimerkiksi rakennusmateriaalien uudelleenkäytöstä eri kohteissa ja materiaalien toimivuudesta rakennusfysikaalisessa mielessä ei kuitenkaan riittävästi ole. Rakennusosien ja -materiaalien uudelleenkäyttö edellyttää toimivaa järjestelmää ja myös tuotteiden laadunvalvontaa. Mikäli ilmastonmuutoksesta johtuvat säänvaihtelut voimistuvat, eivät nykyisetkään rakenteet toimi riittävän hyvin muuttuvissa sääolosuhteissa. Tämä asettaa myös omat vaatimuksensa rakennusmateriaalien uudelleenkäytölle. Rakentamisen kiertotalous jakaantuu pääasiassa rakennustuotteiden uudelleenkäyttöön ja rakennusmateriaalien hyödyntämiseen. Uudelleen käytössä erityisiä haasteita liittyy rakennustuotteiden terveellisyyden ja turvallisuuden todentamiseen. Rakennusmateriaalien hyödyntämisessä materiaalien puhtaus, kemiallinen koostumus ja ympäristövaikutukset korostuvat. Molemmissa tapauksissa kosteuden- ja pölynhallinta, logistiikka, välivarastoinnit ja suunnittelu vaativat lisäpanostuksia, joilla on vaikutusta taloudelliseen kannattavuuteen, mikä on yksi avainkysymyksistä. Jotta rakennusalan kiertotaloudesta voisi syntyä laajasti kannattavaa liiketoimintaa, tulee esimerkiksi tarkastustoiminnan olla sujuvaa ja riittävän edullista. Prosessien pitää olla yksinkertaisia, sujuvia ja selkeitä. Erilaiset riskit on tunnistettava ja otettava haltuun.

Vuoden 2022 joulukuusta Pohjois-Suomen rakennusklusteri on ollut mukana EU-hankkeessa Interreg Aurora Scabeac (Sustainable Construction and Build Environment in Arctic Climate). Pohjois-Ruotsin, Pohjois-Norjan ja Pohjois-Suomen mittavat investoinnit toteutetaan vihreää siirtymän ehdoilla ja ne tarvitsevat kestävä kehityksen osaamista. Klusteri on etsinyt yhteistyökumppaneita cross-border hankkeisiin pohjoissuomalaisista pk- ja startup-yrityksistä, joiden toimintaan on liityttävä kestävä kehityksen ja kiertotalouden tavoitteita ja jonka yhteistyön johdosta on Pohjois-Suomen rakennusklusteriin tullut uusiksi jäseniksi kiertotalouden asiaa ajavia startup-yrityksiä. Pohjois-Suomen Rakennusklusterin keskeinen tavoite on myös alan kiinnostavuuden kasvattaminen. Tavoitteena on lisätä Pohjois-Suomen houkuttelevuutta työnantajana myös vastavalmistuneille. Syksyllä 2023 Klusteri järjestää tietoisuuksia Oulun ja

lähiympäristön kouluissa, jolloin kerrotaan myös kiertotaloudesta ja rakennusalan merkittävästä roolista vihreässä siirtymässä.

2. Säästötausta - pitäisikö termejäkin tarkistaa jatkossa

Rakentamislain [1] pykälä 5:n mukaan rakentamisen on hillittävä ilmastonmuutosta perustamalla elinkaariominaisuuksiltaan kestäviin ja taloudellisiin, energiatehokkaisiin, sosiaalisesti ja ekologisesti toimiviin sekä kiertotaloutta edistäviin ratkaisuihin. Pykälä 57:n mukaan ”Rakennuksen tai sen osan käyttötarkoituksen muuttamisen voidaan katsoa olevan erityinen syy, jos käyttötarkoituksen muuttamisella voidaan tukea rakennetun ympäristön kiertotaloutta ja vähähiilisyttä.” Rakentamislain pykälässä 56 esitetään purkamisluvan edellytykset sekä ”... jos purettava rakennuskohde sijaitsee alueella, jolla rakennukset ovat menettäneet suurimman osan arvostaan. Purkamisen edellytyksenä on tällöin, että purkaminen johtaa merkittävään purkumateriaalien uudelleenkäyttöön tai kierrätykseen.” Luvan hakijan on selvitettävä purkamistyön järjestäminen ja edellytykset huolehtia syntyvän rakennusjätteen käsittelystä sekä käyttökelpoisten rakennusosien uudelleen käyttämisestä. Lisäksi ”Rakennustuotteen valmistajan on jätelain 9 §:ssä tarkoitetulla tavalla huolehdittava rakennustuotteen suunnittelusta ja valmistuksesta ominaisuuksiltaan kestäväksi ja korjattavaksi sekä sellaiseksi, että rakennuskohteesta purettuna sitä voidaan käyttää uudelleen rakentamisessa tai materiaalina hyödynnettävissä olevilta osiltaan.” EU:n rakennustuoteasetus [2] määrittää jäsenvaltiolle säädetyt toimintavelvoitteet.

Uuden hallitusohjelman mukaan [3] kiertotaloudella pidetään Suomen puhtaasta ympäristöstä huolta: ”Suomi parantaa omavaraisuutta, nostaa jalostusastetta ja vähentää saastumista parantamalla materiaalien kierrätystä hyötykäyttöön.” Lisäksi hallitus pyrkii sujuvoittamaan ympäristöön liittyviä lupaprosesseja ja purkaa sääntelyn esteitä kiertotaloudelta: ”Suomi myös edistää kansallinen etu huomioiden Euroopan sisämarkkinoiden kiertotaloutta sekä eurooppalaisten uusiorka-ainemarkkinoiden syntymistä.” Hallitusohjelman mukaan tavoitteena on myös lisätä jätteen käyttöä raaka-aineena: ”Hallitus lisää kierrätysmateriaalien käyttöä markkinaehtoisesti jätelainsäädäntöä muuttamalla... Hallitus parantaa Suomen omavaraisuutta tehostamalla materiaalien ja ravinteiden kiertoa. Siirrytään elinkaariajatteluun, jossa kiertotalouden kautta on löydettävissä kilpailuetua... Kiertotalous otetaan huomioon julkisissa hankinnoissa ja huolehditaan, että myös pk-yritykset voivat osallistua kiertotalouteen.”

Uuden rakentamislain mukaan jätemäärää on vähennettävä ja rakennusosien kierrätystä on edistettävä. Kierrätettävien tuotteiden tai materiaalien on täytettävä myös nykyisen MRL 117 a–117 g §:ssä ja tulevaisuudessa myös rakentamislain olennaiset tekniset vaatimukset, jotka teknisessä näkökulmassa ovat hyvin samansuuntaiset nykyisen lain kanssa. Uudelleenkäyttöosien suhteen on kuitenkin aina muistettava, että niiden turvallisuus sekä terveellisyys on varmistettava ja kierrätyksessä säädöksetkin on huomioitava.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa mahdollistaa esimerkiksi betonin ja tiilimurskan kierrättämisen. Rakennusmateriaali voidaan purkaa ja esimerkiksi pulveroida maarakentamisen tarpeisiin. Purkukohteista saataville uudelleen käytettäville rakennusosille voidaan soveltaa rakennuspaikkakohtaista kelpoisuuden osoittamista. Tällaisia rakennusosia ovat muun muassa hirsikehikot, teräsrungot sekä tilaelementit. Ensimmäinen edellytys rakennusosien uudelleenkäytön mahdollistamiselle on suunnitella uusiokäyttö ennen kuin purkutyöt aloitetaan. Hyödynnettävät materiaalit, purkuosat tai kierrätystuotteet on pidettävä erillään purkujätteestä. Kaikki ymmärtävät, että rakennus- tai purkujätteitä ei voi käyttää hyödyksi rakentamisessa tai korjaamisessa. Joskus kyse on vain

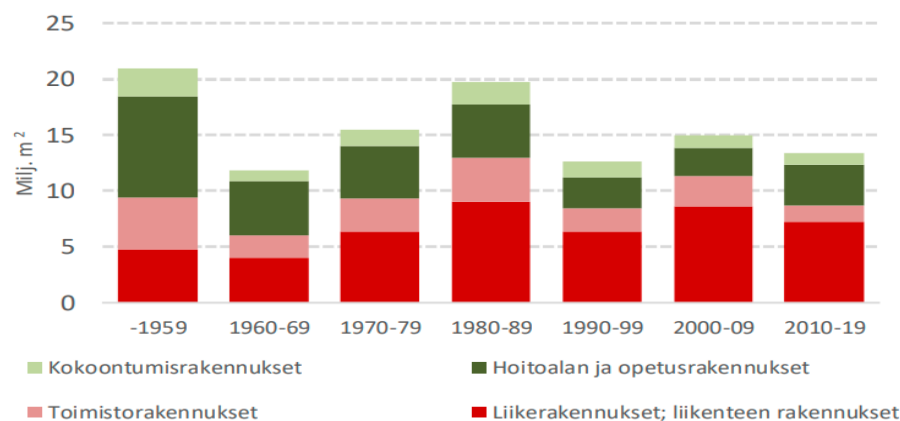
termien oikeasta käyttämisestä. Kierrätysmateriaalien yhteydessä ei pitäisi puhua jätteistä. Esimerkiksi rakennusasetuksen mukainen ”jätteselvitys” johtaa hyvin arveluttavaan tilanteeseen uusiokäytön suhteen. Minimivaatimus terveellisyden osoittamiseen voisi olla rakennuspaikkakohtainen arviointi, mikä pitäisi sisällään rakennusterveysasiantuntijan lausunnon kierrätystuotteiden terveellisyydestä. Tämä arviointi pitäisi tehdä kaikkien kierrätystuotteiden kohdalla. Muita arvioitavia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi lujuus, energiatehokkuus, paloturvallisuus jne. Niiden arviointi on tehtävä tapauskohtaisesti.

3. Tilastokatsaus

Satu Huuhkan väitöstutkimuksessa v. 2016 [4] on tietoja puretusta rakennuskannasta ja materiaaleista. Siinä on analysoitu v. 2000–2014 purettua rakennuskantaa. Vuosien 2000 ja 2012 välillä purettiin yhteensä 50 818 rakennusta vastaten 9 milj. m². Vuosittainen purkamisaste oli 0,25 %, kuitenkin niin että asuinrakennusten purkamisaste oli 0,15 % ja ei-asuinrakennusten 0,65 %. Purettujen asuinrakennusten keskiarvo oli 2166 asuinrakennusta vuodessa. Vuosien 2000–2012 aikana yhdeksän suurimman kaupungin purettujen ja käytössä olevien rakennusten suhde oli pienin asuinkerrostalojen osalta 0,3 % ja suurin teollisuusrakennusten ja varastojen osalta 13,2 %. Purkuun oli arvioitu neljä mahdollista syytä: uudisrakentaminen, vaurioituminen ja luopuminen huonokuntoisuuden vuoksi sekä muut syyt.

Vuosittaisen uudisrakennustuotannon osuus rakennuskannasta vaihtelee suhdanteitten mukaan, tyypillisesti n. 1,5–2 %. Vuoden 2022 koko maan rakennuskanta oli 1 541 943 kpl ja kerrosala 515 753 086 m². [5]. ”Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020–2050” -julkaisun mukaan [6] kerrosalasta 26 % oli rakennettu ennen vuotta 1960. Vuosina 1980–1989 kerrosalasta mitattuna oli rakennettu 18 % ja vuosina 1970–1979 13 % vuoden 2019 lopussa. Rakennusalasta 31 % oli rakennettu v. 1980–1989 ja 23 % v. 1970–1979. Asuinkerrostalojen yhteenlaskettu kerrosala oli 104 milj. m². Rakennuskanta oli 62 000 kpl. Kerrosalalla mitattuna 23 % oli rakennettu kymmenvuotijaksolla 1970–1979.

Muita kuin asuinrakennuksia oli v. 2019 lopussa 144 700, yhteenlaskettu kerrosala on 110 milj. m². Suurimpana ryhmänä liikerakennukset ja liikenteen rakennukset (46,7 milj. m²), hoitoalan ja opetusrakennukset (32,9 milj. m²), toimistorakennukset (19,7 milj. m²) ja kokoontumisrakennukset (10,6 milj. m²). Tässä rakennuskannassa on paljon vanhoja hoitoalan ja opetusalan rakennuksia, jotka ovat rakennettu ennen vuotta 1960. Muun rakennuskannan volyyminä suurin osa on rakennettu ennen vuotta 1960 ja sitten v. 1980–1989. Kaupalliset liikerakennukset ovat selvästi nuorempia kuin julkiset rakennukset (kuva 1).



Kuva 1. Eri vuosikymmeninä rakennettujen ei-asuinrakennusten yhteenlaskettu kerrosala vuoden 2019 lopussa [6].

Vuosina 1970–1979 rakennettiin 196 064 rakennusta, joiden kerrosala oli 82 855 071 m² [5]. Määrällisesti suurimmat ryhmät olivat kerrostalot, 28,7 % kokonaiskerrosalasta, omakoti- ja paritalot 26,6 % ja teollisuusrakennukset 12,8 %. 70–80-luvun rakennetun kannan suuruuden takia voidaan olettaa, että merkittävä osa purkutoimenpiteistä kohdistuu näihin rakennuksiin. Purettavien rakennusten määrä voidaan selvittää purkuluvusta, mutta ne eivät kata täysin kokonaispoistumaa. Peruskorjaukseen tulevien rakennusten korjaussyynä on usein käyttötarkoituksen muutos ja rakenneauriot, myös sisäolosuhteet. Rakennuskannassa on korjausvelkaa, ja korjausvelan kasvu voi johtaa rakennuksen purkamiseen.

Julkaisussa *Uudisrakennustuotannon määrä ja sen jakautuminen rakennusmateriaalien mukaan Suomen kaupungeissa eri tilastoalueilla, eri lääneissä ja koko maassa vuodesta 1952 alkaen* [7] on esitetty rakennustuotannon määrä ja runkomateriaalit 1952–1979. Esimerkkinä 70-luvulla valmistuneiden rakennusten runkomateriaaleista vuoden 1973 tilanne, joka on esitetty taulukossa 1. Tämäntyyppisen lähdemateriaalin perusteella voidaan arvioida purettavien rakennusten runkomateriaalien jakaumaa ja määrää.

Taulukko 1. Vuoden 1973 uudisrakennustuotannonmäärä ja runkomateriaalit. [7]

Vuosi 1973	Runkomat., Kivi*		Puu		Betoni		Tiili		kevytbetoni		Muu		
	1000 m3	kpl	1000 m3	kpl	1000 m3	kpl	1000 m3	kpl	1000 m3	kpl	1000 m3	kpl	
Asuinrakennukset	12125	4232	6670	15190	10106	1754	1794	2299	138	147	88	82	
Kerrostalot	9669	1407	56	18	9383	1346	268	57	9	2	9	2	
Omakotitalot	1284	2317	5273	14331	102	135	1102	2031	52	103	28	48	
Muut asuintalot	1172	508	1341	841	621	223	424	211	77	42	51	32	
Teollisuusrakennukset	7644	1026	1873	674	5782	517	328	161	162	63	1373	285	
Liikerakennukset**	3198	515	1049	1625	2553	247	142	89	44	23	460	156	
Koulut	939	108	171	78	817	76	98	19	7	4	16	9	
Sairaalat, sos.huolto	421	48	11	17	366	35	55	13					
Muut julkiset	822	131	291	198	638	61	159	52	2	4	23	14	
Muut rakennukset	316	434	1698	18060	133	159	30	112	21	48	152	118	
yhteensä	25465	6494	11763	35842	20395	2849	2606	2745	374	289	2112	664	
*(betoni+tiili+kevytbetoni+muu)													
** ml.liikenne rakennukset													
maatalousrakennukset eivät mukana													
maanalaiset rakennukset eivät mukana													

Runkomateriaalin lisäksi purettavissa rakennuksissa on myös muita rakenneosia, kuten eristeet, ovet, ikkunat, putkistot, LVI-laitteet jne. Mahdollista uudelleenkäyttöä ajatellen rakenneosien käytettävyys tulee selvittää, erityisesti rakenteiden haitta-aineiden mahdolliset pitoisuudet ja eristemateriaalien pitoisuudet. Nämä ovat aiheuttaneet sisäilmaongelmia erityisesti silloin kun esimerkiksi ilmanvaihtokorjausten yhteydessä painesuhteet ovat muuttuneet ja pitoisuudet ovat joutuneet sisäilmaan.

Oleellista on myös arvioida, mitä määriä purettavassa rakennuskannassa on mahdollista käyttää uudestaan. Rakennusvalvonnalle jätetään purkutöiden yhteydessä jäteselvitys, joita ei hyödynnetä tilastoinnissa. Tilastomateriaalia on runsaasti eri lähteissä mutta ne ovat hajallaan. Jättemääriä tilastoidaan maassamme toimialakohtaisesti [8]. Sen sijaan tarkempi tilastointi rakennus- ja purkujätteen määrästä ja laadusta on heikommin tilastoitu. Kierrätyksen kannalta tehokkainta olisi työmaakohtainen (syntykohtainen) lajittelu, joka vaatisi jäteastiat erityyppisille jätteille ja työntekijöiden perehdyttämistä ja motivointia. Tavallisesti joku tai jotkut selkeät jätelajit lajitellaan työmaalla ja loppu kuljetetaan sekajätteenä lajiteltavaksi paikalliselle jäteasemalle. Suoraan hyödynnettäviä jätteitä ovat muun muassa energijäte, puujäte, metallit, kipsilevyt ja kattuhuovat. Jatkokäsittelyä vaativat esimerkiksi muovit, sekalainen betonijäte, lasi ja mineraaliviljat [9].

4. Kierrätys alkaa suunnittelupöydältä

Mahdollinen rakennusosien uusiokäyttö on aloitettava jo suunnittelupöydällä. Pääsuunnittelijan tulisi johtaa suunnittelua siten, että purettaville kierrätysosille löytyy uusi osoite suunnitteluryhmän toimesta. Esimerkiksi kierrätystuotteiden purkutyö, varastoinnit, kuljetukset, puhdistukset ja kunnostukset aiheuttavat kustannuksia, jotka jo sinänsä rajoittavat kierrätyksen mahdollisuuksia. Logistiikan lisäksi purkukohteiden ja uusiokäyttökohteiden aikataulut aiheuttavat omat haasteensa kierrätykselle. Pitkät välivarastoinnit lisäävät kustannuksia ja turmeltumisen riskiä. Jos kaikki edelliset tehdään ilman perusteellista ennakkosuunnittelua, on lopputuloksena todennäköisesti kallis harjoitus, ilman resurssiviisautta. Tilaaajien, omistajien, rakennuttajien ja käyttäjien asenteilla on suuri merkitys siihen, kuinka laajaksi toiminnaksi kiertotalous voi rakentamisessa ja korjaamisessa kehittyä.

Oulun rakennusvalvonnassa rakennusosien uudelleenkäyttöä on tarkasteltu hirsikehikoiden siirtämisen ja käyttötarkoituksen muutosten yhteydessä. Uudelleen käytön on oletettu turvallisuuden ja terveellisyysuhteen olevan helposti hoidettavissa. Kuitenkin vanhoissa hirsikehikoissa on hyvin todennäköisesti viitteitä mikrobeista ja niiden täydellinen poistaminen rakenteesta saattaa olla mahdotonta [10]. Voidaanko uudessa käyttötarkoituksessa hyväksyä lainkaan viitteitä mikrobeista? Terveellisyys voidaan arvioida ja hyväksyä kevyimmillään asiantuntijalausunnon perusteella. Oulun rakennusvalvonnan tapauksissa on havaittu, että e-masaintuntijaa eli vastuunkantajaa on vaikea löytää.

Viranomaisten tulisi omassa roolissaan sallia järkevä kierrätys. Se vaatii joustavaa säädöksiä tulkintaa. Rakennusvalvontojen yhteisessä TOPTEN-vähähiilisyys ja kiertotalousryhmässä on rakennusosien uudelleenkäyttöä tarkastelu esimerkinomaisesti tiilien osalta. Riippuen purkutiilien tulevasta kohteesta joudutaan tarkastelemaan esimerkiksi tiilien vedenimukykyä, vesihöyrynläpäisevyyttä, jäätymis-sulamiskestävyyttä, tartuntalujuutta ja palokäyttäytymistä. Edellä mainittujen ominaisuuksien testaamiseen olemassa standardit. Kysymys on siten näytteiden määrästä. Edellä mainittujen ominaisuuksien on arvioitava tai selvitettävä tiilien puhtaus (terveellisyys), johon ei ole olemassa standardia eikä edes yleisesti hyväksyttyä menetelmää. Vähäisten tiilimäärien uudelleenkäyttö voidaan todentaa asiantuntijalausuntoon perustuen, mutta ammattimainen liiketoiminta johtaa väistämättä akreditoitun tutkimuslaitoksen laadunvalvontaan. Uudelleenkäyttöosien energiatehokkuus, takuukysymykset ja tuleva käyttöikä on myös huomioitava. Tämän päivän rakennusmateriaali on huomisen jätettä tai parhaimmillaan se on huomisen uusioraaka-ainetta. Uutta ajattelua tarvitaan. Pitäisikö purkusuunnitelma tehdäkin jo uudisrakentamisen luvan myöntämisen yhteydessä? Se voisi johtaa sellaisten menetelmien ja rakennusosien suunnitteluun, jotka olisivat helposti kunnostettavissa, siirrettävissä tai kierrätettävissä. Ammattimaiset purku-urakoitsijat, jätehuoltoyritykset ja lajitteluyritykset ovat avainasemassa, kun kehitetään toimivia kierrätyksen konsepteja.

5. Kiertotalous yksi kolmesta Pohjois-Suomen rakennusklusterin päätavoitteesta

Pohjois-Suomen Rakennusklusteri on vuonna 2001 perustettu rekisteröity yhdistys. Klusteri yhdistää Pohjois-Suomen rakentamisalan yritykset, oppilaitokset ja viranomaiset toimimaan rakentamisalan sekä alueellisen kehittämisen parhaaksi [11]. Vuonna 2019 Klusteri laajentui voimakkaasti 10 jäsenestä 70 jäseneksi ja maltillinen kasvu on jatkunut siitä lähtien. Kesällä 2022 järjestetyssä hallituksen työpajassa, jossa kehitettiin klusterin toimintaa, valittiin yhdeksi klusterin kolmesta ”päätähdessä” kiertotalous. Kolmikantaisuus tekee siitä laajapohjaisen keskittymän rakentamistoimialaa eteenpäin ajavana yhteisönä. Klusteri on jaettu 7 jaostoon ja

yhteen tiimiin. Kaikki jaostot tekevät tällä hetkellä työtä kiertotalouden eteenpäin viemiseksi yhdessä ja erikseen. Määräyksiä voidaan kyseenalaistaa ja viedä palautetta viranomaisten tietoon sekä suunnittelijat voivat perustella näkemyksiään tuotantoon. Tuotannon puolelta voidaan sitten tuoda kaikkien muiden osapuolten tietoon talouselämän realiteetit ja yhdessä pohtia, miten ikuinen ongelma eli raha voidaan huomioida.

6. Yhteenveto

Jotta uudelleen käytettävien rakennusosien ja materiaalien kierrätystä voidaan suunnitella, tulisi rakennusmateriaaleista ja rakennusten purkamistiedoista olla yhdistettyä ja kohdennettua tilastomateriaalia. Alan kansainvälistä sekä kotimaista tutkimusta on ollut paljon ja tavoitteet ovat korkealla, mutta reunaehdoja ei ole tarkennettu. Määräyksiä ja ohjeistusta tulisi tarkentaa. Kierrätys ja uusiokäyttö tulisi ottaa paremmin suunnittelukäytännöissä huomioon. Siihen liittyvää koulutusta tulisi kaikilla tasoilla kehittää. Purkaminen ja kierrätys tulee ilmeisesti tulevaisuudessa eriytymään omaksi palveluliiketoiminnaksi. Tilannetta voidaan verrata rakennustuotannon ja kiinteistönhallinnan suhteeseen. Eri toimijoiden välistä yhteistyötä on kehitettävä. Pohjois-Suomen Rakennusklusteri osaltaan mahdollistaa tuloksellisen yhteistyön ja muodostaa hyvän alustan. Rakentamislain ja muiden määräysten mukaan kiertotaloutta on edistettävä, mutta esimerkiksi rakennusvalvontaviranomaisen kannalta käytännön toimenpiteiden ohjeistus puuttuu. ”Vauhtia on mutta suunta ei ole selkeä”.

Lähdeluettelo

- [1] Rakentamislaki 7521/2023
- [2] EU Rakennustuoteasetus
- [3] Vahva ja välittävä Suomi. Neuvottelutulos hallitusohjelmasta 16.6.2023
- [4] Huuhka, Satu. Building 'Post-Growth' Quantifying and Characterizing Resources in the Building Stock. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1414. Tampereen teknillinen yliopisto - Tampere University of Technology, Tampere 2016
- [5] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennukset ja kesämökit [verkkójulkaisu]. ISSN=1798-677X. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 14.8.2023]. <http://www.stat.fi/til/rakke/index.html>
- [6] Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020-2050 SUOMI Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2010/31/EU), muutettuna direktiivillä 2018/844/EU artiklan 2a mukainen ilmoitus 10.3.2020
- [7] Rintanen, R., lehtinen, E. Uudisrakennustuotannon määrä ja sen jakautuminen rakennusmateriaalien mukaan Suomen kaupungeissa eri tilastoalueilla, eri lääneissä ja koko maassa vuodesta 1952 alkaen. Tuomas 52 (Tuotanto ja materiaalit). VTT Rakennustalouden laboratorio, marraskuu 1982.
- [8] Tilastokeskus. Jätetilasto. <http://www.stat.fi/til/jate/>
- [9] <https://rakennustarkkailija.com/2021/07/05/rakennuslan-jatteet-ja-kierratys/>
- [10] Hirsirakennusten uudelleenkäytön terveellisyyden ja rakennusosien kelpoisuuden arviointi. Oulun rakennusvalvonta. Luonnos 17.10.2022
- [11] www.rakennusklusteri.fi

Energiaparannusten pitkäaikaisvaikutukset asuinkerrostalokohteiden sisäilmastoon

Elmeri Sorsa¹, Virpi Leivo², Minna Kempe¹ ja Ulla Haverinen-Shaughnessy¹

¹ Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

² Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

Tiivistelmä

Energiaparannusten vaikutuksia energiankulutukseen ja sisäympäristön laatuun on tutkittu aikaisemmin Suomessa mm. INSULAtE-projektissa vuosina 2010–2015. Tämän jatkotutkimuksen tavoitteena on tarkastella energiaparannusten vaikutuksia pidemmällä (vähintään 8 vuoden) aikavälillä. Tutkimuksia tehtiin alkuperäisen protokollan mukaisesti pääosin lämmityskaudella yhteensä 13:n asuinkerrostalon 47 asunnossa. Alustavien tulosten perusteella olosuhteet tutkituissa asunnoissa olivat säilyneet jokseenkin ennallaan verrattuna aikaisempiin seurantamittauksiin (noin vuosi energiaparannusten jälkeen). Esimerkiksi kahden kuukauden mittausajalla ei vuoden 2022 uusintamittauksissa havaittu merkittäviä muutoksia sisälämpötilojen keskiarvoissa (T_c 20,7°C, T_w 22,4°C) verrattuna aikaisempiin seurantamittauksiin. Myös suhteellisen kosteuden osalta keskiarvot olivat pysyneet lähes ennallaan (RH_c 29,6 %, RH_w 27,2 %). Radonpitoisuuden keskiarvo oli 16 Bq/ m³ pienempi kuin aikaisempien pitoisuuksien keskiarvo, mikä voi osittain selittyä alhaisemmalla määritysrajalla. Jatkossa parittaiset tarkastelut ja (otoskoon salliessa) monitasomallit antavat tarkempaa tietoa mahdollisista muutoksista eri tutkimuskertojen välillä, sekä vaikutuksista asukkaiden kokemaan sisäympäristön laatuun ja terveyteen.

1. Johdanto

Rakennusala on merkittävä energian käyttäjä ja kasvihuonepäästöjen tuottaja Euroopan Unionin alueella, sillä sen osuus energian loppukulutuksesta on peräti 40 prosenttia ja kasvihuonepäästöjenkin osalta 36 prosenttia. Samalla rakennusala voidaan nähdä hyvänä mahdollisuutena päästöjen hillinnässä, sillä kolme neljäsosaa EU:n rakennuskannasta on energiakulutuksen osalta tehotonta [1]. Tilastokeskuksen mukaan pelkästään rakennusten lämmitykseen käytetyn energian osuus Suomessa vuonna 2021 oli 27 prosenttia maan koko energiankulutuksesta [2]. Lisäksi Tilastokeskuksen arvion mukaan suomalaisten rakennusten lämmityksestä aiheutui päästöjä 12,5 miljoonaa hiilidioksiditonnia, joka oli lähes neljännes vuoden 2019 Suomen kokonaispäästöistä [3].

Asuinrakennusten energiaparannukset saattavat vaikuttaa myös sisäilmaston laatuun. Tutkimustuloksia aiheesta on niukasti, mutta esimerkiksi 1973 öljykriisin seurauksena rakennusten läpivientejä tukittiin energiaparannusten nimissä ilman, että korvausilman saantia varmistettiin. Tämä jatkotutkimus toteutettiin osana Suomen Akatemian rahoittamaa Balance-projektia. Tutkimuksen kohteena olivat vuosina 1960–1980 valmistuneet asuinkerrostalot, joista oli kerätty tietoa kyselyiden, haastattelujen ja mittausten avulla INSULAtE-projektissa vuosina 2010–2015.

2. Menetelmät

Jatkotutkimukseen osallistui 13:n eri asuinkerrostalon 47 asuntoa. Tutkitut kohteet sijaitsivat Tampereella, Nokialla, Ylöjärvellä, Lempäälässä sekä Hämeenlinnassa. Tyypillisiä energiaparannustoimenpiteitä, joita asuntoihin oli kohdistettu, olivat ikkunoiden vaihto, IV- ja/tai lämmitysjärjestelmän parannus sekä ulkovaipan lisäeristäminen [4]. Kohteissa oli tehty aikaisemmat mittaukset ennen energiaparannuksia (1. mittauskerta) ja noin vuosi energiaparannusten jälkeen (2. mittauskerta). Vuoden 2022 uusintamittauksissa (3. mittauskerta) asunnoissa mitattiin alkuperäisen protokollan mukaisesti sisälämpötilaa ja suhteellista kosteutta oleskeluvyöhykkeeltä (T_w) ja kylmimmästä pisteestä (T_c) kahden kuukauden ajan (kaksi mittauspistettä/ asunto). Mittauslaitteena lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta käytettiin jatkuvasti tunnin välein tallentavia mittareita DT-172 (mittausalue lämpötilan osalta $-40...+70$ °C, tarkkuus ± 1 °C; suhteellisen kosteuden osalta mittausalue 3 %-100 %, tarkkuus ± 3 %).

Mittausjakson alussa mitattiin hiilidioksidia ja pienhiukkasia 24 tunnin ajan sekä tehtiin hetkellisiä ilmanvaihto ja paine-eromittauksia. Hiilidioksidia (CO_2) mitattiin 24 tunnin ajan jatkuvatoimisella mittarilla Delta Ohm HD 21AB17 (mittausalue 0-5000 ppm, tarkkuus ± 50 ppm tai ± 3 %). Mittarit asennettiin oleskeluvyöhykkeelle, yleensä asuntojen olohuoneeseen. Pienhiukkasia koskevat tulokset raportoidaan muualla. Ilmanvaihtoa mitattiin asuntojen ilmanvaihtopäätteistä. Mittaukset suoritettiin Testo 417-virtausnopeusmittarilla (mittausalue $+0,3...+20$ m/s, tarkkuus 0,1 m/s + 1,5 % mv:stä). Kaikki asuntojen ilmanvaihtopäätteet mitattiin.

Asuntojen radonpitoisuutta mitattiin Säteilyturvakeskukselta tilatuilla mittauspurkeilla ohjeistuksen mukaisesti. Mittausjakso oli vähintään kaksi kuukautta (tammi-toukokuu 2022). Lisäksi kerättiin pölynäytteet samalla (kahden kuukauden) ajanjaksolla.

Asukkaita pyydettiin täyttämään asumisterveyskysely (1 / asunto). Lisäksi täysi-ikäisiä asukkaita pyydettiin täyttämään asumisterveyspäiväkirjaa päivittäin kahden viikon ajanjaksolla.

3. Tulokset

3.1 Sisälämpötila ja suhteellinen kosteus

Yhteensä 41 asunnosta on sisälämpötilan ja -suhteellisen kosteuden mittaustulokset kaikilta mittauskerroilta. Oleskeluvyöhykkeen lämpötiloissa ei havaittu merkittäviä muutoksia vuoden 2022 mittauksissa verrattuna aikaisempien mittauskertojen tuloksiin (Taulukko 1). Asuntojen kylmimpien pisteiden osalta lämpötilat olivat hieman laskeneet 2. mittauskertaan verrattuna, mutta keskiarvot olivat kuitenkin vuoden 2022 mittauksissakin lähellä 21 astetta (Taulukko 2).

Taulukko 1. Asuntojen sisälämpötilat oleskeluvyöhykkeellä (T_w [°C]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	41	41	41
Keskiarvo	22,8	22,8	22,4
Keskihajonta	1,1	1,0	1,3
Mediaani	22,8	22,9	22,7
5. persentiili	21,0	21,2	20,0
95. persentiili	24,2	24,2	23,9

Taulukko 2. Asuntojen sisälämpötilat kylmimmissä pisteissä (T_c [$^{\circ}C$]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	41	41	41
Keskiarvo	20,9	21,1	20,7
Keskihajonta	1,6	1,6	1,7
Mediaani	21,0	21,1	21,0
5. persentiili	18,2	18,4	17,3
95. persentiili	22,8	23,2	22,8

Asuntojen sisäilman suhteellisen kosteuden osalta tulokset olivat sekä oleskeluvyöhykkeellä (Taulukko 3) että kylmimmissä pisteessä (Taulukko 4) pysyneet lähes ennallaan. Kaikilla mittauskerroilla sisäilman suhteellinen kosteus jäi keskiarvoisesti alle 30 %.

Taulukko 3. Asuntojen sisäilman suhteellinen kosteus oleskeluvyöhykkeellä (RH_w [%]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	41	41	41
Keskiarvo	25,7	27,6	27,2
Keskihajonta	5,6	5,1	4,0
Mediaani	25,8	27,9	27,2
5. persentiili	15,5	19,4	22,0
95. persentiili	33,5	33,3	33,7

Taulukko 4. Asuntojen sisäilman suhteellinen kosteus kylmimmissä pisteissä (RH_c [%]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	41	41	41
Keskiarvo	28,0	29,7	29,6
Keskihajonta	5,5	5,9	4,3
Mediaani	27,9	31,1	29,8
5. persentiili	20,7	20,3	23,9
95. persentiili	36,6	36,8	36,8

3.2 Ilmanvaihto ja hiilidioksidi

Ilmanvaihdon osalta tarkasteltiin ilmanvaihtokerrointa, joka oli hieman laskenut vuoden 2022 mittauskerralla verrattuna 2. mittauskerran tuloksiin (Taulukko 5). Asuntojen ilmanvaihto kuitenkin poisti ilmaa keskimäärin 15 litraa sekunnissa asukasta kohden.

Taulukko 5. Asuntojen ilmanvaihtokerroin (ACR [$l/s/hlö$]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	38	38	38
Keskiarvo	15,4	17,9	15,1
Keskihajonta	8,1	9,8	8,1
Mediaani	14,3	16,0	13,5
5. persentiili	3,6	6,8	4,9
95. persentiili	29,4	34,0	27,0

Asuntojen keskimääräiset CO_2 pitoisuudet olivat pysyneet lähes samalla tasolla vuoden 2022 mittauksissa verrattuna vuoden 2. mittauskerran tuloksiin (Taulukko 6). Pitoisuudet olivat pääsääntöisesti alle 1000 ppm.

Taulukko 6. Asuntojen hiilidioksidipitoisuudet (CO₂ [ppm]) eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	39	39	39
Keskiarvo	683	673	685
Keskihajonta	128	188	154
Mediaani	678	653	702
5. persentiili	498	469	469
95. persentiili	925	971	935

3.3 Radon

Asuntojen sisäilman radonpitoisuuden osalta mittaustuloksia kaikilta kolmelta mittauskerralta oli 31 eri asunnosta. Radonpitoisuuksien keskiarvo oli hieman laskenut toiseen tutkimuskertaan nähden (Taulukko 7) ollen 2022 mittauskerralla 37 Bq/ m³.

Taulukko 7. Asuntojen radonpitoisuudet [Bq/ m³] eri mittauskerroilla.

	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus
Otoskoko	31	31	31
Keskiarvo	49	46	37
Keskihajonta	25,0	25,0	22,0
Mediaani	40	40	32
5. persentiili	20	20	20
95. persentiili	90	100	85,5

3.4 Asukaskyselyt

Asumisterveyskyselyjen perusteella havaittiin eroja mm. asukkaiden itsensä raportoimissa sisälämpötiloissa: vuoden 2022 jatkoseurannassa raportoitiin tyypilliseksi sisälämpötilaksi 20–22 astetta suhteessa useammin ja 22–24 astetta vastaavasti vähemmän verrattuna 2. tutkimuskertaan. Samalla talvella liian kylmää sisälämpötilaa raportoivien osuus pieneni 22 prosentista 6 prosenttiin, ja myös vetoisuutta sekä kylmiä pintoja raportoivien osuus pieneni. Toisaalta ikkunan aukipitämistä talvella lämpötilan kontrolloimiseksi raportoivien osuus kasvoi 37 prosentista 47 prosenttiin. Aineiston pienemmän koon sekä taustamuuttujissa havaituitten erojen takia tarvitaan tarkempia analyyseja lopullisten johtopäätösten vetämiseksi. Jatkoanalyysien tulokset raportoidaan myöhemmin.

4. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa selvitettiin energiaparannusten vaikutusta sisäilmastoon pidemmällä aikavälillä. Tutkimusten perusteella olosuhteet tutkituissa asunnoissa olivat pysyneet jokseenkin ennallaan verrattuna aikaisempiin seurantamittauksiin, jotka oli tehty noin vuosi energiaparannusten jälkeen. Energiankulutuksen kannalta ilmanvaihtomäärät oli mittaushetkillä melko korkeat, keskimäärin lähes 15 l/s asukasta kohden. Myös sisälämpötiloissa havaittiin kuitenkin edelleen säätövaraa, oleskeluvyöhykkeiden keskilämpötilojen ollessa yli 22 astetta.

Lähdeluettelo

- [1] KOM/2020/562 lopullinen, ”Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle” 2020 [verkkójulkaisu]. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562>

- [2] Tilastokeskus, ”Energian hankinta ja kulutus,” Tilastokeskuksen PX-Web tietokannat, 2020 [verkkojulkaisu]. Saatavilla: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12vk.px/
- [3] Tilastokeskus, ”Kasvihuonekaasut,” 2020 [verkkojulkaisu]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-06-03_tie_001_fi.html
- [4] Du, Liuliu; ym. ”INSULAtE-project results; Improving energy efficiency of multifamily buildings, indoor environmental quality and occupant health,” 2016 [verkkojulkaisu]. Saatavilla: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131468/URN_ISBN_978-952-302-772-5.pdf?sequence=1&isAllowed=y

B9. Akustinen suunnittelu ja kuntotutkimus

Standardi SFS 5907 ”Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus”

Mikko Kylliäinen¹, Simo Laitakari¹, Timo Huhtala¹, Matias Remes², Pekka Taina², Johannes Usano³, Ville Veijanen⁴, Janne Hautsalo⁵ ja Oskar Lindfors⁵

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy

² Sitowise Oy

³ Insinööritoimisto W. Zenner Oy

⁴ Oy Meluton Ab

⁵ Akukon Oy

Tiivistelmä

Standardin SFS 5907 toinen laitos julkaistiin joulukuussa 2022. Ensimmäinen laitos oli ollut käytössä vuodesta 2004 ohjaamassa erilaisten rakennushankkeiden akustiikkasuunnittelua. Ympäristöministeriön annettua vuonna 2017 ääniympäristöasetuksen ja ääneneristävyuden mittalukujen muututtua standardi oli vanhentunut. Standardin uudistamisesta vastannut työryhmä aloitti toimintansa vuoden 2021 alussa. Tekemiensä kyselyiden ja selvitysten perusteella työryhmä totesi, että standardia on uudistettava perusteellisesti myös muista näkökohdista kuin pelkästään mittalukujen määritelmiä koskien. Vuonna 2004 standardiin oli otettu mukaan neliportainen rakennusten akustinen luokitusjärjestelmä, joka todettiin liian hienojakoiseksi ja muutettiin kolmiportaiseksi. Uudistetun standardin laatuluokka A2 vastaa määräyksissä esitettyjä velvoitteita, luokka A1 mahdollistaa määräystasoa akustisesti parempien rakennusten suunnittelun ja toteuttamisen ja luokka A3 on tarkoitettu vain vanhojen rakennusten luokitteluun. Standardin ensimmäinen laitos ei ottanut kantaa raideliikenteen aiheuttamaan tärinään eikä runkomeluun. Kahden vuosikymmenen kuluessa ensimmäisen laitoksen julkaisemisesta rakentaminen ratojen varrelle tai päälle on merkittävästi yleistynyt, joten standardityöryhmä katsoi tarpeelliseksi sisällyttää myös ohjeavot sallituille tärinä- ja runkomelutasoille erilaisissa rakennuksissa, kuten asunnoissa, sairaaloissa, kouluissa ja toimistoissa.

1. Johdanto

Rakennusten akustiikkaa koskevien määräysten laatimista ehdotettiin Suomessa ensi kerran vuonna 1948. Ehdotus ei tuolloin vielä johtanut määräysten syntymiseen, vaan 1950- ja 60-luvuilla laadittiin ehdotuksia ja suosituksia ääneneristysmääräyksiksi [1]. Kun Suomen rakentamismääräyskokoelma julkaistiin vuonna 1975, siihen sisällytettiin osana C1 myös rakennusten ilma- ja askelääneneristystä, huoneakustiikkaa ja meluntorjuntaa koskevat säädökset, jotka tulivat voimaan vuonna 1976. Rakentamismääräyskokoelman osa C1 uudistettiin vuonna 1984 ja uudistetut määräykset astuivat voimaan 1.7.1985. Seuraava uudistus tehtiin 1998 ja uudistettuja määräyksiä tuli noudattaa vuoden 2000 alusta [2]. Vuonna 1984 annettuihin määräyksiin oli sisällytetty eniten rakennus- ja tilatyyppejä, mutta vuonna 1998 teknisinä mittalukuina annettiin määräyksiä vain asuinrakennuksista [3].

Vuoden 1998 määräykset edellyttivät muilta kuin asuinrakennuksilta, että ne on ”suunniteltava ja rakennettava siten, että melu, jolle rakennuksessa tai sen lähellä ovat altistuvat, pysyy niin alhaisena, ettei se vaaranna näiden henkilöiden terveyttä ja että se antaa mahdollisuuden nukkua, levätä ja työskennellä riittävän hyvissä olosuhteissa”. Suunnittelu ja toteutus oli tehtävä niin, että toimintaa vastaavat riittävän hyvät ääniolosuhteet on mahdollista saavuttaa. [3]

Varsin pian vuoden 2000 jälkeen havaittiin, että määräys- ja ohjearvojen puuttuessa erityisesti koulujen, päiväkotien ja toimistojen ääniolosuhteissa oli alkanut ilmetä ongelmia. Koska ei ollut odotettavissa, että määräyksiä kovin nopeasti muutettaisiin, vuosina 2002–2004 laadittiin ehdotus määräyksiä täydentäväksi standardiksi, joka vuonna 2004 julkaistiin otsikolla SFS 5907 *Rakennusten akustinen luokitus* [4]. Standardissa annettiin suositukset akustisille tavoitearvoille asuinrakennuksissa, hotelleissa, palvelutaloissa, kouluissa, päiväkodeissa, sairaaloissa, toimistotiloissa ja teollisilla työpaikoilla [5].

Vuonna 2004 julkaisun standardin vaikuttavuudesta ei ole tehty tutkimuksia lukuun ottamatta pian sen julkaisemisen jälkeen tehtyä selvitystä vuonna 2006 [6]. Standardi oli tuolloin muodostumassa yleisesti käytetyksi suunnitteluohjeksi, jota on käytetty akustisten tavoitteiden asettamisessa esimerkiksi hankesuunnitelmissa sekä julkisissa että yksityisissä rakennushankkeissa. Lisäksi standardia on käytetty tarjouspyynnöissä ja urakka-asiakirjoissa. Standardin voidaan katsoa vaikuttaneen myös siihen, että vuonna 2017 annettuun ääniympäristöasetukseen [7] ja ääniympäristöohjeeseen [8] palautettiin teknisinä mittalukuja annettuja vaatimustasoja myös muista rakennus- ja tilatyypeistä kuin asunnoista. Tilojen väliset ilma- ja askelääneneristysvaatimukset määritteleviin mittalukuihin tuli myös muutoksia.

Ääniympäristöasetuksen ja -ohjeen myötä standardissa SFS 5907 [5] vuonna 2004 esitetyt vaatimustasot olivat muodostuneet osin ristiriitaisiksi määräysten kanssa. Standardin julkaisemisen jälkeisinä vuosikymmeninä monet muut, esimerkiksi akustisia mittauksia määrittelevät standardit oli päivitetty, ja viittaukset näihin standardeihin olivat vanhentuneet. Näistä syistä oli syntynyt tarve standardin toisen laitoksen laatimiseksi.

Standardin toisen laitoksen valmistelutyö alkoi vuoden 2021 alussa. Työryhmässä oli edustettuna eritoten akustiikkasuunnittelua tekeviä yrityksiä, ja lisäksi kuultiin asiantuntijoina materiaaliteollisuuden ja tutkimuslaitosten edustajia. Työryhmä toteutti aluksi standardin uudistustarpeita koskevan kyselyn ja jatkoi tämän jälkeen standardin valmistelua työpajatyöskentelyllä. Kesällä 2022 standardiehdotuksesta järjestettiin lausuntokierros. Lausuntokierrosten jälkeen viimeistelty standardin toinen laitos [9] julkaistiin joulukuussa 2022.

2. Standardin keskeiset muutokset

2.1 Standardin soveltamisala ja tavoitteet

Uudistettu standardi SFS 5907 *Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus* [9] määrittelee rakennuksille akustisen laatuluokitusjärjestelmän. Kussakin akustisessa luokassa on annettu teknisinä mittalukuina tavoitearvot raja-arvot ilma- ja askelääneneristykselle, rakennuksen teknisten järjestelmien aiheuttamille äänitasoille sekä rakennuksen sisä- että ulkopuolella, liikenteen aiheuttamille äänitasoille, huoneakustiikalle sekä liikenteen aiheuttamalle tärinälle ja runkomelulle.

Uudistetussa standardissa rakennukset ja tilat on akustisten ominaisuuksien perusteella jaettu kolmeen luokkaan, joista

- luokka A1 on akustisesti vaativin luokka,
- luokka A2 vastaa ääniympäristöasetuksessa [7] säädettyjä velvoitteita ja
- luokka A3 on tarkoitettu vain vanhojen rakennusten akustisten ominaisuuksien ilmoittamiseen eikä sitä käytetä uudisrakentamisessa.

Aiemmassa standardissa laatuluokitus oli neliportainen [4,5] (A, B, määräystasoa vastaava C ja vanhojen rakennusten luokitteluun tarkoitettu D), mutta se oli koettu liian hienojakoiseksi eikä luokan A vaatimukset täyttäviä rakennuksia kovinkaan usein ollut toteutettu.

Standardin SFS 5907:2022 mukaan rakennuksen tai tilan akustisen luokan ilmoittaminen edellyttää sen akustisten ominaisuuksien todentamista mittauksin kansainvälisissä standardeissa esitettyjen mittausmenetelmien mukaisesti. Vaatimus perustuu siihen, että standardissa esitettyjen akustisten ominaisuuksien toteutuminen riippuu sekä suunnittelun että rakentamisen laadusta. Suunnittelutyö yksistään ei takaa vaadittujen akustisten ominaisuuksien saavuttamista, mikä näkyy esimerkiksi asuinrakennusten akustisen laadun kehittämisessä 1950-luvulta 2000-luvulle [2]. Standardia voidaan kuitenkin käyttää aina suunnittelun apuvälineenä, vaikka mittauksia ei tehtäisikään, mutta tällöin rakennuksen akustista luokkaa ei voida ilmoittaa.

Laatuluokitus sisältää raja-arvot erilaisille tiloille ja rakennustypeille, kuten asunnoille, hotelleille, palvelutaloille, toimistorakennuksille, oppilaitoksille, päiväkodeille, liikuntatiloille, terveydenhuollon rakennuksille, teollisuustyöpaikoille ja WC- ja hygieniatiloille. Standardissa annetaan myös raja-arvot tilanteisiin, joissa asuin-, majoitus- tai potilashuoneisiin kytkeytyy äänekkäitä tiloja. Raja-arvot on annettu myös tärinäherkille laitteille ja tiloille, jota on esimerkiksi sairaaloissa ja laboratorioissa. Standardin soveltamisalaan eivät kuulu konserttisalit, teatterit, äänitystilat eivätkä muut vastaavat erikoistilat, joille akustiset tavoitteet asetetaan aina tapauskohtaisesti.

2.2 Standardin laajuus

Standardin SFS 5907:2022 kattavuus on merkittävästi kasvanut ja esitystapa täsmentynyt verrattuna standardiin SFS 5907:2004 (taulukko 1). Esimerkiksi erilaisten mittalukujen ja muiden käsitteiden määritelmien lukumäärä on kasvanut kuudesta 65:een ja rakennustyyppien määrä kahdeksasta 12:een.

Taulukko 1. Standardin SFS 5907 ensimmäisen (2004) ja toisen (2022) laitoksen laajuus vertailussa.

Laajuus	SFS 5907:2004	SFS 5907:2022
Sivumäärä	36	56
Määritelmiä	6	65
Lähteitä	24	41
Liitteitä	8	0
Akustisia luokkia	4	3
Rakennustyyppiä	8	12

Standardin tieteellinen perusta on nyt myös laajempi kuin aiemmin. Standardin ensimmäisessä laitoksessa lähteitä oli 24, mutta ne olivat suurimmaksi osaksi muita standardeja, kuten akustisia mittauksia ja mittalukuja määritteleviä kansainvälisiä standardeja. Nyt lähteitä on 41. Näistä suurin osa on standardin soveltamisalaan kuuluvien rakennusten ja tilojen akustiikkaa koskevaa tieteellistä tutkimusta [esim. 10–15] tai oppaita [esim. 2,16,17]. Lähteiden lisäksi standardissa on velvoittavia viittauksia 13 kansainväliseen standardiin, jotka koskevat akustisia mittauksia tai mittalukuja.

2.4 Ääneneristävyyden uudet mittaluvut

Vuonna 2017 annettu ääniympäristöasetus [7] määritteli tilojen väliset ääneneristysvaatimukset uusilla mittaluvuilla. Vuodesta 1967 lähtien oli käytetty ilmaääneneristyslukua R'_w ja 10 m^2

absorptioalaan normeerattua askeläänitasolukua $L'_{n,w}$ [2]. Ääniympäristöasetuksessa vaatimukset tilojen väliselle ääneneristävyydelle on annettu 0,5 s jälkikaiunta-aikaan normeerattuna standardisoituna äänitasoerolukuna $D_{nT,w}$ ja askeläänitasolukuna $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$. Jälkikaiunta-aikaan normeerattujen ääneneristävyyden mittalukujen on todettu vastaavan paremmin asumismelun siirtymistä huoneistosta toiseen huoneistoon [18,19]. Askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ ottaa huomioon myös askelääneneristävyyden subjektiivisen kokemuksen kannalta merkittävät taajuudet alueella 50–100 Hz [14].

Askelääneneristävyyden mittaamenetelmät määrittelevään kansainväliseen standardiin oli vuonna 2015 lisätty pientaajuusmenetelmä, joka koskee mittauksia 60, 63 ja 80 Hz taajuuskaistoilla, kun huoneen tilavuus on alle 25 m³. Mittausepävarmuuden pienenemiseen tähtäävä menetelmä on alkuaan kehitetty ilmaääneneristävyyden mittauksia varten eikä sen soveltavuudesta askelääneneristävyyden mittauksiin ollut vuonna 2015 tehty tieteelliset kriteerit täyttävää tutkimusta. Myöhemmin tehdyn tutkimuksen [20] perusteella voitiin todeta, että menetelmä on askelääneneristävyyteen sovellettaessa virheellinen eikä sitä tule käyttää. Siten myös standardissa SFS 5907:2022 on todettu, että askelääneneristävyyden mittauksissa ei käytetä SFS-EN ISO 16283–2 [21] esitettyä pientaajuusmenettelyä.

2.6 Tärinä ja runkomelu

Standardi SFS 5907:2004 ei sisältänyt lainkaan tavoitearvoja tie- ja raideliikenteen aiheuttamalle tärinälle ja runkomelulle. Osittain tähän on vaikuttanut se, että näitä ilmiöitä koskevat VTT:n ohjeet [22–24] ovat ilmestyneet vasta standardin ensimmäisen laitoksen julkaisemisen jälkeen. Toisaalta VTT:n ohjeissa ei ole annettu tavoitearvoja kaikille standardin soveltamisalaan sisältyville rakennus- ja tilatyypeille, mutta suunnittelutyössä tällaisia arvoja on jo pitkään tarvittu.

Standardin ensimmäisen laitoksen julkaisemisen jälkeen tietämys keinoista tärinän ja runkomelun leviämisen mittaus- ja mallinnusmahdollisuuksista sekä torjuntaratkaisuksista sekä niiden suunnittelusta on kasvanut [25–28]. Standardin ensimmäisen laitoksen julkaisemisen jälkeen sekä ratahankkeiden määrä että rakentaminen ratojen läheisyyteen tai päälle ovat merkittävästi kasvaneet, mistä on syntynyt tarve antaa kootusti ja kattavasti raja-arvot eri rakennus- ja tilatyypeissä sallittaville tärinä- ja runkomelutasoille. Standardissa SFS 5907:2022 ne on annettu suurimpina sallittuina maaperäisen runkoäänen tunnusluvun L_{prm} (dB) ja tärinän tunnusluvun v_{w95} (mm/s) arvoina.

3. Yhteenveto

Standardin SFS 5907 uudistettua laitosta (2022) laadittaessa on otettu huomioon akustiikan alalla 20 vuoden aikana tehty tutkimustyö. Uudistustyössä on otettu huomioon standardin ensimmäisen laitoksen käytöstä saatu kokemus sekä rakennusten ja tilojen akustiikkasuunnittelussa ja sitä koskevissa määräyksissä tapahtuneet muutokset. Uudistettu standardi edustaa myös akustiikkasuunnittelualan yhteistä ajantasaista näkemystä hyvästä ääniympäristöstä.

Lähdeluettelo

- [1] Kylliäinen, M. 2009. Kansainväliset yhteydet vuoden 1967 ääneneristysnormien muotoutumisessa. Tekniikan Waiheita. Nro 3, 29–47.

- [2] Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2014. Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mittaustulosten perusteella. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöhallinnon ohjeita 1/2014. 68 s.
- [3] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa - Määräykset ja ohjeet. 1998. Helsinki, ympäristöministeriö.
- [4] Hirvonen, M., Hongisto, V., Kylliäinen, M. & Lehtonen, K. 2005. Standardi SFS 5907 rakennusten akustisesta luokituksesta. Akustiikkapäivät 2005. Kuopio, 26.–27.9., Akustinen Seura ry, 111–116.
- [5] SFS 5907:2004. Rakennusten akustinen luokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 36 s.
- [6] Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Akustiikkastandardin SFS 5907 vaikutus rakennusten ääniolosuhteisiin. Sisäilmastoseminaari 2007. Espoo, 14.3.2007, Sisäilmayhdistys ry, SIY Raportti 25, 137–141.
- [7] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. Suomen säädöskokoelma 796/2017.
- [8] Ääniympäristö – Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 2018. Helsinki, ympäristöministeriö.
- [9] SFS 5907:2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 57 s.
- [10] Haapakangas, A., Hongisto, V., Eerola, M. & Kuusisto, T. 2017. Distraction distance and disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 141(1), 127–136.
- [11] Hongisto, V., Varjo, V., Leppämäki, H., Oliva, D. & Hyönä, J. 2015. Toimistohuoneiden välisen ilmaääneneristyksen vaikutus työtehokkuuteen. Akustiikkapäivät 2015. Kuopio, 26.–27.9., Akustinen Seura ry, 198–203.
- [12] Kylliäinen, M. 2014 The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 100(4), 640–648
- [13] Kylliäinen, M., & Pääkkönen, R. 2017. Avointen oppimisympäristöjen edellyttämät ääniolosuhteet. Rakennusfysiikka 2017. Tampere, 24.–26.10., Tampereen teknillinen yliopisto ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 591–596.
- [14] Kylliäinen, M., Hongisto, V., Oliva, D. & Rekola, J. 2017. Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings. Acta Acustica united with Acustica. Vol. 103(2), 236–251.
- [15] Jääskeläinen, V. 2022. Julkisivun ääneneristävyyden mittausten menetelmät. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu, signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos.
- [16] Kylliäinen M. & Hongisto, V. 2019. Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki, ympäristöministeriön julkaisuja 28/2019.
- [17] Sipari P. & Saarinen, A. 2003. Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108.
- [18] Kylliäinen, M., Takala, J., Oliva, D. & Hongisto, V. 2016. Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings. Applied Acoustics. Vol. 102., 12–18.
- [19] Lietzén, J., Kylliäinen, M. & Takala, J. 2016. Justification of standardized impact sound pressure levels in rating of impact sound insulation of floors. Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2016. Hamburg, August 21-24, paper no. 226.
- [20] Kylliäinen, M., Talus, L., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Latvanne, P. 2022. Assessment of the low-frequency procedure in the field measurements of impact sound insulation between dwellings. Applied Acoustics. Vol. 185, article 108399.

- [21] SFS-EN ISO 16283-2:2020. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
- [22] Talja, A., Vepsä, A, Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo, VTT Tiedotteita 2425.
- [23] Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi – Esiselvitys. Espoo, VTT Tiedotteita 2468.
- [24] Talja, A. 2011. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo, VTT Tiedotteita 2569.
- [25] Huhtala, T., Ruohonen, M. & Kylläinen, M. 2017. Kalkkisementtistabiloinnin teknistaloudellinen soveltuvuus liikennetärinän vaimennukseen. Rakennusfysiikka 2017. Tampere, 26.10., Tampereen teknillinen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- [26] Oksanen, B., Lietzén, J., Huhtala, T. & Kylläinen, M. 2021. A case study on railway-induced ground-borne noise numerical modelling. Proceedings of Euronoise 2021. Madeira, October 25–27, 1776–1783.
- [27] Huhtala, T., Oksanen, B. ja Kylläinen, M. 2021. Pori-Mäntyluoto-testiradan tärinä- ja runkomelumittaukset 2021. Akustinen Seura ry, Turku, 24.–25.11.2021. Akustinen Seura ry, 20–25.
- [28] Huhtala, T. & Oksanen, B. 2023. Uudet laskentamenetelmät raideliikenteen tärinän ja runkomelun arvioinnissa. Rautatietekniikka. Nro 1, 18–19.

Julkisen rakennuksen akustinen kuntotutkimus

Saana Romula, Mikko Kylliäinen ja Jesse Lietzén
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Rakennusalalla on pitkään tehty kuntotutkimuksia, joilla selvitetään rakenneavauksin, mittauksin ja laboratoriotutkimuksin rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa tai erilaisia vaurioitumismekanismeja. Samoin rakennusten sisäilmaan liittyvät sisäilmatutkimukset ovat jo pitkään olleet vakiintuneita. Akustiikan näkökulmasta rakennuksissa toteutetaan akustisia mittauksia korjaushankkeiden suunnittelun lähtötiedoiksi, mutta ala ei tunne akustisen kuntotutkimuksen käsitettä tai systemaattisia menetelmiä sellaisen toteuttamiseksi. Vuonna 2022 valmistuneessa tutkimuksessa tuotettiin aineistoa akustisen kuntotutkimuksen systematiikan luomiselle erityisesti julkista rakentamista ajatellen. Aineistoa tuotettiin tutkimalla koulurakennusten akustiikkaa koskevien määräysten kehittymistä sekä suorittamalla kymmenessä koulukohteessa akustiikan mittauksia. Lisäksi koulujen opettajille toteutettiin käyttäjäkysely. Merkittävin tulos tutkimuksesta oli se, että rakennuksen iästä ei voida päätellä akustiikan kunnosta mitään. Lisäksi kohteiden kunnostustarpeet ovat vaihtelevia, jonka vuoksi akustiikan kuntotutkimukseen on sisällytettävä monipuolisesti akustiikan mittauksia, kohdekatselmus sekä käyttäjäkysely.

1. Johdanto

Rakenneteknisten kuntotutkimusten suorittamiseen on laadittu Suomessa oppaita 1990-luvulta saakka [1,2]. Erilaisten kuntotutkimusten tarkoituksena on selvittää muun muassa tutkittavan osa-alueen kunto sekä korjaustarve. Kuntotutkimusten tuloksia hyödynnetään tarvittavien korjaustoimenpiteiden ennakoimiseksi sekä peruskorjauksen hankesuunnitteluvaiheen tueksi. [2,3] Tutkittavasta ilmiöstä tai kohteesta riippumatta rakennetekniset kuntotutkimukset etenevät pääpiirteittäin samankaltaisesti. Aluksi käydään läpi kohteesta säilynyt suunnitelma-aineisto ja suoritetaan kohdekäynti, minkä pohjalta arvioidaan kohteen tutkimustarpeet. Tämän jälkeen suoritetaan rakennetekniset kuntotutkimukset muun muassa mittauksin. Saatu tutkimusaineisto analysoidaan ja tutkimustuloksista laaditaan tilaajalle raportti, johon sisällytetään muun muassa suositeltavien korjaustoimenpiteiden kuvaus. [1–3]

Vastaavanlaista systematiikkaa akustiikan kuntotutkimukselle ei ole. Akustiikan näkökulmasta rakennuksissa toteutetaan akustisia mittauksia korjaushankkeiden suunnittelun lähtötiedoiksi, mutta peruskorjaushankkeiden hankesuunnittelussa akustiikkaa käsitellään hyvin vähän. Ympäristöministeriön ääniympäristöohjeen mukaisesti korjausrakentamishankkeissa rakennuksen ääniolosuhteita ei saa heikentää [4], minkä lisäksi käyttäjän ja tilaajan tavoitteena korjaushankkeissa on yleensä rakennuksen ääniolosuhteiden parantaminen. Lisäksi akustiikka on kustannuksiin vaikuttava tekijä. Näistä seikoista seuraa se, että rakennusten akustiselle kuntotutkimukselle on tarve.

Vuonna 2022 valmistuneessa tutkimuksessa laadittiin rakenneteknisten kuntotutkimusten systematiikan sekä tuotetun tutkimusaineiston pohjalta julkisen rakentamisen akustiikan kuntotutkimuksen malli. Tutkimusaineistoa tuotettiin selvittämällä koulurakennusten akustiikkaa koskevien määräysten kehittymistä Suomessa sekä suorittamalla kymmenessä eri ikäisessä koulukohteessa akustiikan mittauksia. Lisäksi koulujen opettajille toteutettiin käyttäjäkysely.

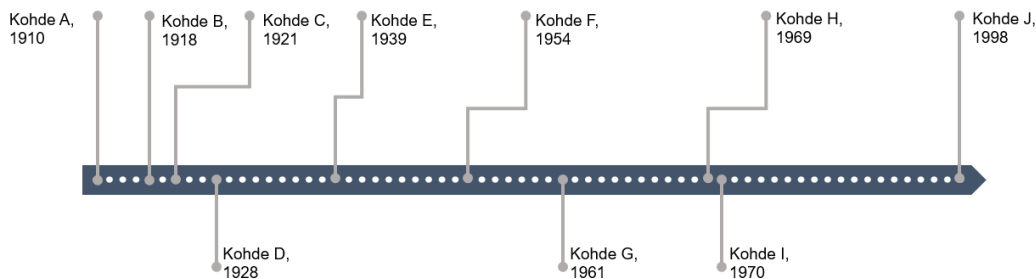
2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Kouluja koskevat määräykset ja ohjeet

Tutkimuksessa käytiin läpi Suomessa voimassa olleet määräykset tai määräyksiin rinnastettavat julkaisut 1960-luvulta 2000-luvulle [5–11]. Määräyksistä tarkasteltiin vain koulurakennuksien suunnittelua koskevat tavoitteet ja määräykset. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin muita koulurakennusten akustiikan suunnitteluohjeita ja -oppaita [12].

2.2 Tutkitut koulurakennukset

Tutkimuksessa tutkittiin kymmentä Helsingissä sijaitsevaa koulukohtetta. Koulukohteet pyrittiin valitsemaan siten, että jokaista 1900-luvun vuosikymmentä edustaisi vähintään yksi koulu, jotta mahdollisimman kattava kuva eri ikäisten rakennusten akustiikan kunnosta voitaisiin muodostaa. Alla olevassa kuvassa on esitetty tutkittujen koulujen rakennusvuodet.



Kuva 1. Tutkittujen koulujen valmistumisvuodet.

Rakenteiltaan tutkitut koulurakennukset olivat kivirakenteisia ja erityisesti ennen 50-lukua rakennetuissa kohteissa esiintyi pääsääntöisesti massiivitiilirakenteita. Uudemmissa koulurakennuksissa rakenteiden rakennepaksuudet olivat selvästi ohuempia ja esimerkiksi lasiseinien ja -ikkunoiden osuus mitatuista rakenteista kasvoi.

Osana tutkimusta koulurakennusten säilynyt suunnitelma-aineisto käytiin läpi. Suunnitelma-aineistoihin sisältyi muun muassa jo tehtyjen peruskorjausten ja -parannusten toteutussuunnitelmia. Lisäksi joidenkin kohteiden rakennepiirustuksia oli säilynyt. [13] Mikään kohteista ei ollut tutkimushetkellä alkuperäisessä kunnossa. Kohteissa suoritettiin akustiikan mittauksen aikana katselmuksia, joissa tutkittavien tilojen ääniympäristöä havainnoitiin aistinvaraisin menetelmin.

2.3 Akustiset mittaukset

Tutkimuksen kohteena olevissa kouluissa suoritettiin ilma- ja askelääneneristävyyden sekä jälkikaiunta-ajan ja puheensiirtoindeksin (STI) mittauksia kyseisten ilmiöiden mittausstandardien mukaisesti [14–20]. Nämä akustiikan mittaukset valittiin siksi, että nykymääräyksissä näille akustiikan suureille on esitetty tavoitearvot [4].

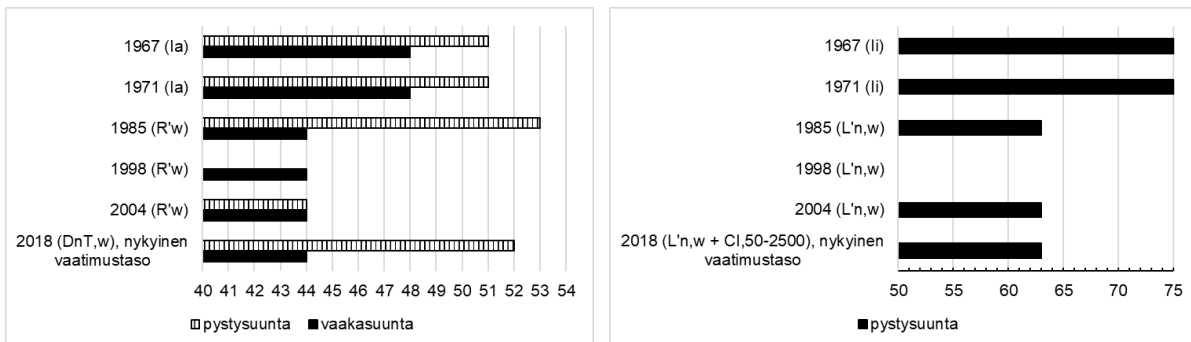
2.4 Käyttäjäkysely

Tutkittujen koulukohteiden opettajille toteutettiin käyttäjäkysely. Kyselyn avulla kartoitettiin, miten käyttäjä kokee ääniympäristön. Käyttäjäkyselyssä oli kysymyksiä liittyen huoneakustiikan, ääneneristävyyden ja taustäänitason ilmiöihin ja niiden häiritsevyyteen.

3. Tulokset

3.1 Määräysten kehittyminen

Kun tarkastellaan koulurakennusten ääneneristävyyksien määräysten kehittymistä, on huomioitava, että teknisten mittalukujen määritelmien muuttumisen vuoksi vanhoja määräyksiä ei voida suoraan verrata nykyisiin vaatimuksiin tai toisiinsa. Mittalukujen muuntaminen vastaamaan nykyisiä voidaan tehdä Ympäristöhallinnon ohjeen mukaisesti [21]. Tässä tutkimuksessa mittalukuja ei muunnettu. Lisäksi huomioitavaa oli, että vuoden 1975 Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 ei esitetty määräyksiä koulurakennuksille [22]. Alla olevissa kuvissa on esitetty esimerkkinä luokkahuoneiden ääneneristävyyksien määräysten kehittyminen.

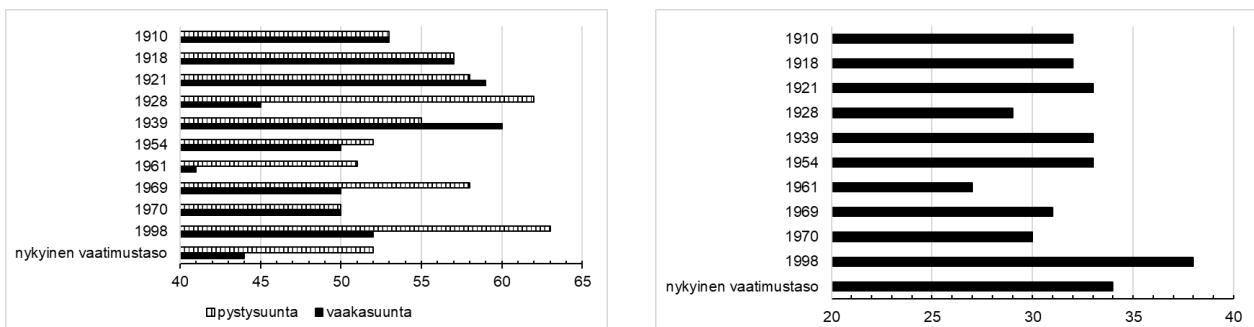


Kuva 2. Ilmaääneneristävyyden (vas.) sekä askelääneneristävyyden (oik.) vaatimusten kehitys luokkahuoneille.

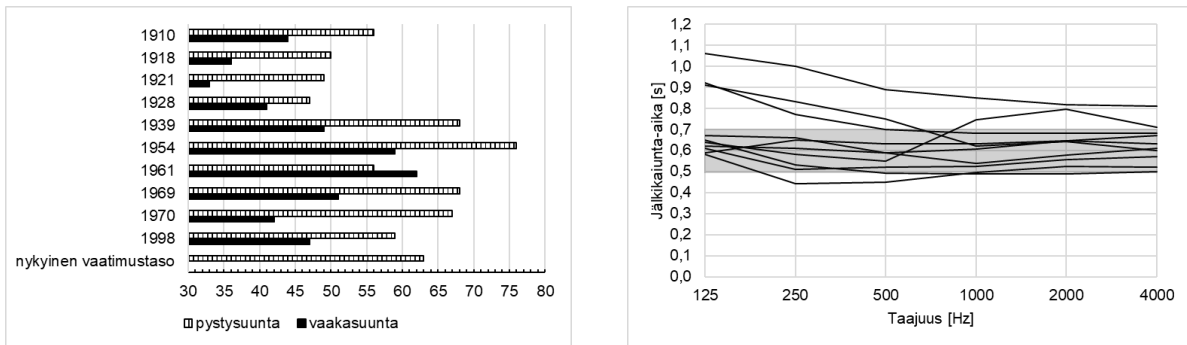
Käytäessä läpi suunnitteluohjeita- ja oppaita todettiin, että tietoa ja apua koulurakennusten akustiikan suunnitteluun on ollut tarjolla jo ennen määräystasoisia julkaisuja sekä niiden aikana.

3.2 Akustisten mittausten tulokset

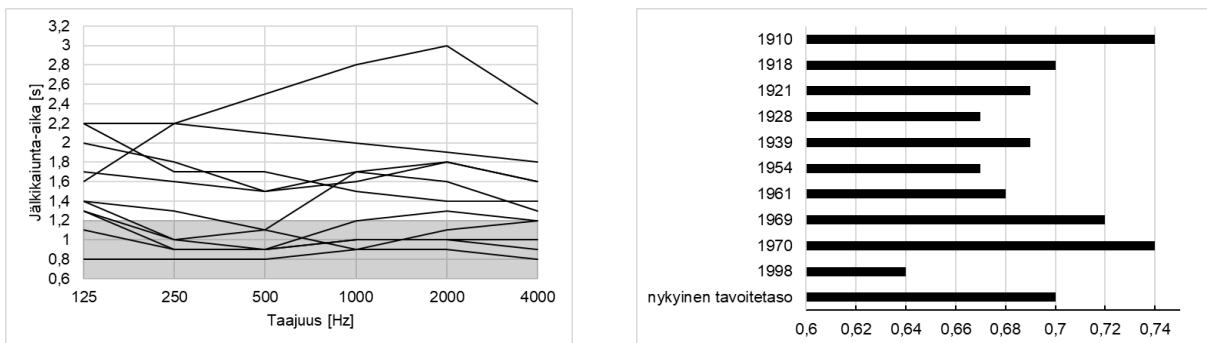
Alla olevissa kuvissa on esitetty kohteiden ikäjärjestyksessä luokkahuoneiden ääneneristävyyksien, jälkikaiunta-ajan sekä puheensirtoindeksin STI mittausten tulokset. Lisäksi on esitetty liikuntasalien jälkikaiunta-ajan tulokset. Mitä suurempi äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvo on, sen parempi on tilojen välinen ilmaääneneristävyys. Päinvastoin mitä pienempi on askeläänitasoluvun $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ arvo, sen parempi on tilojen välinen askelääneneristävyys [4]. Myös jälkikaiunta-ajan osalta pienempi arvo kuvastaa yleensä huoneakustisesti toimivampaa tilaa.



Kuva 3: Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ luokkahuoneiden (vas.) ja käytävän ja luokkahuoneen (oik.) välillä.



Kuva 4: Askeläänitasoluku $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ huoneistojen välillä (vas.) sekä luokkahuoneiden mitatut jälkikaiunta-ajat, harmaalla alueella nykyinen tavoitetaso (oik.).



Kuva 5: Liikuntasalien mitatut jälkikaiunta-ajat, harmaalla alueella nykyinen tavoitetaso (vas.) sekä Luokkahuoneiden puheensiirtoindeksin STI tulokset (oik.).

3.3 Käyttäjäkyselyn tulokset

Tutkimuksen osana toteutetun käyttäjäkyselyn tulokset pääsääntöisesti myötäilivät akustiikan mittauksista saatuja tuloksia. Joiltain osin kyselytutkimuksen vastaukset tarkensivat häiritseväksi koettuja ilmiöitä, minkä lisäksi kyselystä saatiin tietoa käytön aikaisista häiritsevyystekijöistä. Mittaus- ja katselmushetkellä yhdeksässä koulussa kymmenestä ei ollut toimintaa kesälomakauden vuoksi.

4. Akustisen kuntotutkimuksen malli

4.1 Tulosten tarkastelu

Katselmuksista, käyttäjäkyselyistä ja akustiikan mittauksista saatuja tuloksia ja havaintoja tarkastelemalla huomattiin, että koulukohteiden ongelmakohdat ja korjaustarpeet vaihtelivat kohteittain. Lähes jokaisessa kohteessa käytävien ja luokkahuoneiden välinen ilmastoinen eristävyys oli heikko, mutta muilta osin rakenteiden ääneneristävyyden taso vaihteli jopa yksittäisen koulukohteen sisällä. Lisäksi kohteissa oli havaittavissa esimerkiksi puutteita liikuntasalien vaimennusmateriaalin riittävydessä.

Yksi merkittävimmistä havainnoista oli kuitenkin se, että järjestettäessä koulukohteet ikäjärjestykseen vanhimmasta uusimpaan voitiin todeta, ettei koulujen rakennusajankohdasta voitu päätellä akustiikan kunnosta mitään. Esimerkiksi kohteista uusin täytti kaikki rakenteellisen ääneneristävyyden vaatimukset, mutta tämän kohteen luokkahuoneen puheensiirtoindeksi oli heikoin kaikista mitatuista luokkahuoneista. Tämän ja muiden vastaavien havaintojen johdosta (kuvat 3–5) voitiin todeta, että akustiikan kuntotutkimusta tehtäessä vanhoista määräyksistä tai ohjeista ei voida päätellä mitään eikä tulosten vertailu niihin ole tarkoituksen mukaista.

Kohdekatselmus sekä käyttäjäkysely tarjoavat kuntotutkijalle tärkeää tietoa kohteen korjaustarpeista. Tutkimuksen aikana kohdekatselmuksessa voitiin havainnoida esimerkiksi puutteellisia rakennusosien sekä läpivientien tiivistyksiä, äänen kulkeutumisreittejä ja vaimennusmateriaalien määrää eri tiloissa. Lisäksi käyttäjäkyselyn vastauksista voitiin huomata esimerkiksi se, että kohdekatselmuksen aikana havaitun liikennemelun sijaan opettajat kokivat opetustilanteessa häiritsevämmäksi käytön aikaiset melutasot luokkatiloissa sekä leikkivien lasten äänet ulkoa.

4.2 Kuntotutkimuksen mallin muodostaminen

Edellä mainituista tekijöistä johtuen akustiikan kuntotutkimuksen mallista muodostettiin mahdollisimman kartoittava, jotta rakennusten kohdekohtaiset kunnostustarpeet voidaan selvittää. Ensimmäisenä kuntotutkimuksessa käydään kohteen säilynyt suunnitelma-aineisto läpi, minkä avulla tutustutaan muun muassa kohteen tilajakoon, käytettyihin rakennetyyppeihin ja laaditaan kohteeseen mittausuunnitelma. Lisäksi jo kuntotutkimuksen alussa on tärkeää käydä keskustelua tilaajan kanssa tutkimuksen tavoitteista sekä mahdollisista rajoituksista.

Kuntotutkimukseen tulee sisällyttää kohdekatselmus, ääneneristävyyden sekä huoneakustiikan mittauksia ja käyttäjäkysely. Näistä saatuja tuloksia vertaillaan keskenään, jonka lisäksi akustiikan mittauksista saatuja tuloksia verrataan nykyisiin määräyksiin ja tavoitetasoihin. Tällä tavoin paikannetaan kohteen akustiikan puutteet ja korjaustarpeet. Jos tulosten käsittelyvaiheessa huomataan tarve mahdollisille lisätutkimuksille, laaditaan suunnitelma niiden toteuttamiseksi.

Kun kaikki tutkimukset on suoritettu, laaditaan tehdystä kuntotutkimuksesta raportti. Raporttiin tulisi sisältyä vähintään tieto suoritetuista tutkimuksista, niistä saadut tulokset, tehdyt johtopäätökset sekä ehdotus korjaustoimenpiteistä. Korjaustoimenpiteitä laadittaessa on tärkeää muistaa, ettei kohteen nykyisiä ääniolosuhteita saa heikentää [4]. Lisäksi kuntotutkimusraportti on laadittava siten, että se on mahdollisimman ymmärrettävä ja selkeä.

Korjaustoimenpiteiden tavoitteet asetetaan hankekohtaisesti siten, että otetaan huomioon kohteen olemassa olevat ääniolosuhteet, määräykset siitä, ettei näitä olosuhteita saa heikentää sekä muut mahdolliset hankkeen asettamat tavoitteet. Tällaisia muita tavoitteita voivat olla esimerkiksi tilaajan omat tavoitteet ääniolosuhteiden parantamiseksi tai suojeltujen rakennusten asettamat reunaehdot muutostoimenpiteille.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tuotettiin aineistoa julkisten rakennusten akustiikan kuntotutkimuksen mallille. Tutkimukseen sisältyi kirjallisuuskatsaus akustiikkaa koskevien määräysten ja ohjeiden kehityksestä Suomessa, minkä lisäksi tutkittiin kymmentä eri ikäistä koulukohtetta. Koulukohteiden säilynyt suunnitelma-aineisto käytiin läpi ja kohteissa suoritettiin katselmuksia, akustiikan mittauksia sekä käyttäjäkysely.

Merkittävin tulos tutkimuksesta oli se, että koulurakennusten iästä ei voitu päätellä akustiikan kunnosta mitään. Lisäksi korjaustarpeet tutkituissa koulurakennuksissa vaihtelivat. Näistä syistä akustiikan kuntotutkimuksen on oltava mahdollisimman kartoittava ja siihen sisällytetään kohdekatselmus, ääneneristävyyden ja huoneakustiikan mittauksia sekä käyttäjäkysely.

Lähdeluettelo

- [1] BY42, Betonijulkisivun kuntotutkimus. 2019. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry.
- [2] Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristöopas 2016: Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [3] Suomen Betoniyhdistys ry. 2014. Betonijulkisivun ja parvekkeiden kuntotutkimus, tilaajan ohje 2014. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry.
- [4] Ympäristöministeriö. 2018. Ääniympäristö: Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [5] RIL 55. Ääneneristysnormit. 1967. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- [6] RIL 55b. Ääneneristysnormit (1967). 1971. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- [7] Ympäristöministeriö. 1984. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [8] Ympäristöministeriö. 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [9] Sisäasiainministeriö. 1978. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C5: Ääneneristys, ohjeet. Helsinki, Sisäasiainministeriö.
- [10] Ympäristöministeriö. 1984. Suomen Rakentamismääräyskokoelma, osa C5: Ääneneristys, ohjeet. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [11] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017
- [12] Romula, S. 2022. Julkisten rakennusten akustinen kuntotutkimus. Saatavilla <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/143293>
- [13] Helsingin rakennusvalvonnan arkisto. 2021. Saatava aineisto tilattavissa <https://kauppa.lupapiste.fi/>
- [14] SFS-EN ISO 16283-1. 2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building element. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [15] SFS-EN ISO 16283-2. 2020. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [16] SFS-EN ISO 3382-1. 2009. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [17] SFS-EN ISO 3382-2. 2008. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [18] SFS-EN ISO 3382-3. 2021. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [19] SFS-EN ISO 717-1. 2020. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [20] SFS-EN ISO 717-2. 2020. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [21] Lietzén, J. ja Kylliäinen, M. 2014. Ympäristöhallinnon ohjeita 1-2014, Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden vertailu vanhojen mittaustulosten perusteella. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [22] Sisäasiainministeriö. 1975. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys. Helsinki, Sisäasiainministeriö.

Hätäpoistumistilanteen taustäänitaso äänievakuointijärjestelmän suunnittelussa

Janne Saarelainen, Toni Poikonen, Olli Salmensaari ja Timo Peltonen
Akukon Oy

Tiivistelmä

Äänievakuointijärjestelmän tuottamaan riittävään puheenymmärrettävyyteen hätäpoistumistilanteessa vaikuttavat äänievakuointijärjestelmä, kuulutusjärjestelmän äänitaso, hätäpoistumistilanteen taustäänitaso, järjestelmän toimintakyky sekä tilan huoneakustiikka. Suunnitteluun ja todentamiseen liittyvissä ohjeissa on esitetty reunaehdot kuulutusjärjestelmän tuottaman äänitason ja signaalikohinasuhteen osalta, mutta hätäpoistumistilanteiden taustäänitasoista ei ole monipuolista ohjeistusta tai lukuarvoja, joita voisi hyödyntää kuulutusjärjestelmän suunnittelussa tai todentamisessa. Erilaisten tilojen ja hätäpoistumistilanteiden taustäänitasojen ohjearvoilla voitaisiin parantaa varmuutta riittävän signaalikohinasuhteen saavuttamiseksi.

1. Johdanto

Hätäpoistumistilanteessa ohjeistus voidaan antaa äänievakuointijärjestelmän avulla. Äänievakuointijärjestelmä voi toimia paloilmoittimen äänihälyttimenä. Espoon Matinkylästä Kivenlahteen toteutetussa rakennushankkeessa Länsimetron jatke suunniteltiin ja todennettiin äänievakuointijärjestelmä osana paloilmoittimia. Äänievakuointijärjestelmällä toistetaan nauhoitettuja kuulutuksia. Tässä artikkelissa pohditaan äänievakuointijärjestelmän ohjeistuksiin liittyviä puutteita käyttäen aineistona Länsimetron jatkeen suunnitteluperiaatteita ja käyttöönottomittaustuloksia.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Tilojen valinta

Lähtöaineistona on käytetty rakennushankkeen Länsimetron jatke suunnitelmia ja mittaustuloksia. Lähtöaineisto käsittää kokonaisuudessaan 5 kpl asemalaitureita, 33 kpl akustisesti erilaista aulaa ja sisäänkäyntiä sekä 27 kpl erilaista poistumisporrasta, pystykuilua ja sammutusreittiä.

Lähtöaineisto supistettiin laadullisesti asemalaitureihin – asemalaitureiden tilaominaisuudet, akustiset ominaisuudet, äänievakuointijärjestelmät ja tekniset laitteet muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden.

Asemalaituri on pituudeltaan noin 90 m ja leveydeltään noin 16 m ($A \approx 1\,440\text{ m}^2$). Asemalaiturin tilavuus raidealueet huomioiden on noin $16\,000\text{ m}^3$. Kuvassa 1 on esitetty havainnekuva asemalaiturista Finnoon asemalta.



Kuva 1. Finnoon asemalaituri. Lähde: Länsimetron kuvapankki.

2.2 Keskeiset suureet ja reunaehdot

Artikkelissa käytettävät keskeiset suureet, ohjearvot ja kuvaukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Käytetyt suureet, ohjearvot ja selitteet.

Suure	Ohjearvo [1]	Kuvaus [1]
T [s]	$\leq 1,3$	Jälkikaiunta-ajan keskiarvo oktaavikaistoilla 500 Hz, 1 000 Hz ja 2 000 Hz
$L_{A,eq,T}$ [dB]	≥ 75	Kaiutinjärjestelmän tuottama äänitaso kuuntelukorkeudella
L_A [dB]	≤ 65	Referenssitaustäänitaso, ohjeellinen menetelmä.
L_A [dB]	≥ 85	Lukuarvo, jota suuremmilla taustäänitasoilla tulisi äänievakuointijärjestelmän tueksi asentaa myös visuaalinen hälytyslaitteisto
$STI_{90\%,avrg}$	$\geq 0,50$	Puheenymmärrettävyyden aritmeettinen keskiarvo 90 % alueella lattiapinta-alasta
STI_{min}	$\geq 0,45$	Yksittäisen pisteen minimiarvo tarkastelualueella
STIPA	90 %: $\geq 0,50$ min: $\geq 0,45$	Yksinkertaisempi menetelmä puheenymmärrettävyyksmittauksille STI-menetelmään verrattuna, joka soveltuu käytettäväksi kaiutinjärjestelmillä. STIPA-tavoitteet ovat yhtenevät STI-tavoitteiden kanssa.
SNR [dB]	≥ 6	Signaalikohinasuhde, hätäkuulutuksen äänitason ja taustäänitason erotus vähintään. Tavanomaisesti 6–15 dB riittävä.

2.3 Asemalaitureiden suunnitteluperiaatteet

Suunnitteluperiaatteena on tuottaa riittävä puheenymmärrettävyys kuulutuksille hätäpoistumistilanteessa. Puheenymmärrettävyystavoitteina on käytetty teknisen spesifikaation CEN/TS 54-32 ohjearvoja [1]. Tavoitteiden saavuttamiseksi suunnitteluvaiheessa on määritetty äänievakuointikuulutuksissa käytettävät kaiuttimet, kaiuttimien sijainnit, kaiuttimien tuottama äänitaso kuuntelukorkeudella (seisontakorkeus), kaiuttimien tehotarve, arvio hätäpoistumisen aikaisesta taustäänitasosta ja jälkikaiunta-aikatavoite sekä tavoitteen täyttävät huoneakustiset ratkaisut.

Suunnittelumenetelmänä on käytetty huoneakustista mallinnusmenetelmää. Huoneakustista mallinnusta varten on luotu tilamallit ohjelmistolla Trimble SketchUp Pro (v. 2017). Huoneakustinen mallinnus on toteutettu ohjelmistolla Odeon Combined (v. 14). Huoneakustisella mallinnusmenetelmällä voidaan hyödyntää kaiuttimien ominaisuuksia kuten suuntaavuutta, tehoa ja taajuusvastetta sekä tilan huoneakustisia ominaisuuksia.

Asemalaitureiden keskeisinä huoneakustisina pintoina toimivat katonrajan melusiepot ja sivuseinien yläosat. Asemakohtaisesti on variaatiota melusieppojen suunnassa ja sivuseinien yläosien materiaaleissa. Vaimennusta saadaan näiden lisäksi mm. metroraitteiden sepelistä ja tunneliaukoista. Kokonaisabsorptioalan vaihtelu asemalaitureiden välillä on vähäistä.

Asemalaitureille valikoituneet lautaskaiuttimet ovat nähtävissä kuvassa 1.

2.4 Asemalaitureiden mittaukset

Käyttöönoton yhteydessä tehdyt äänievakuointijärjestelmän puheenymmärrettävyyssmittaukset on tehty teknisen spesifikaation CEN/TS 54-32:2015 ja standardin IEC 60268-16:2020 mukaisesti STIPA-menetelmällä [1,2]. Taustäänitaso on käsitelty mittaushetken taustäänitasosta hätäpoistumistilanteen taustäänitasoon IEC 60268-16:2020 liitteen M mukaisesti [2]. Jälkikaiunta-aikamittaukset on tehty katkaistun kohinan menetelmällä standardin ISO 3382-2:2008 mukaisesti [3].

STIPA-mittaukset ja savunpoiston äänitasomittaukset on tehty viideltä asemalaiturilta. Jälkikaiunta-aikamittaukset on tehty yhdeltä asemalaiturilta. Savunpoiston äänitasomittaukset on tehty lyhyelle savunpoistoreitille ja pitkälle savunpoistoreitille.

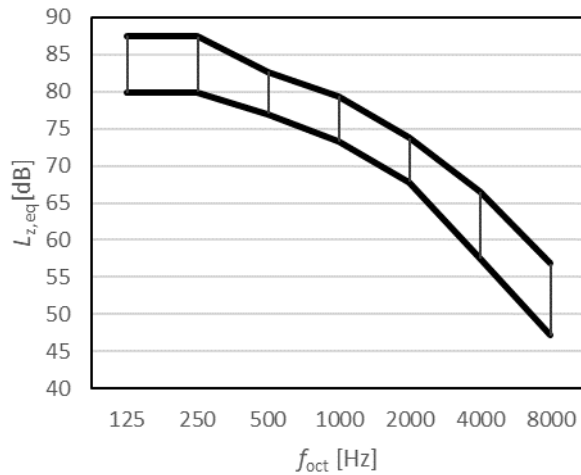
3. Mittaustulokset

Asemalaiturin jälkikaiunta-ajan mittaustulos on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Asemalaiturin jälkikaiunta-ajan mittaustulos.

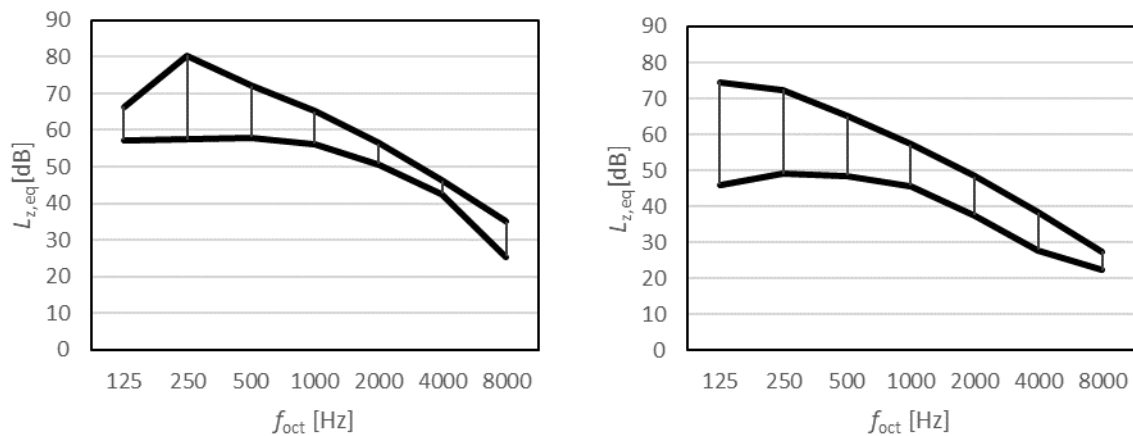
Suure	Taajuus f oktaavikaistoittain						
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T [s]	4,1	2,3	1,8	1,3	1,3	1,4	1,2

Asemalaitureiden STIPA-mittausten STIPA-signaalin äänenpainetason vaihteluväli on esitetty taajuuden suhteen kuvassa 2. Signaalin keskiäänitason vaihteluväli on $L_{A,eq,T} = 78 \dots 90$ dB.



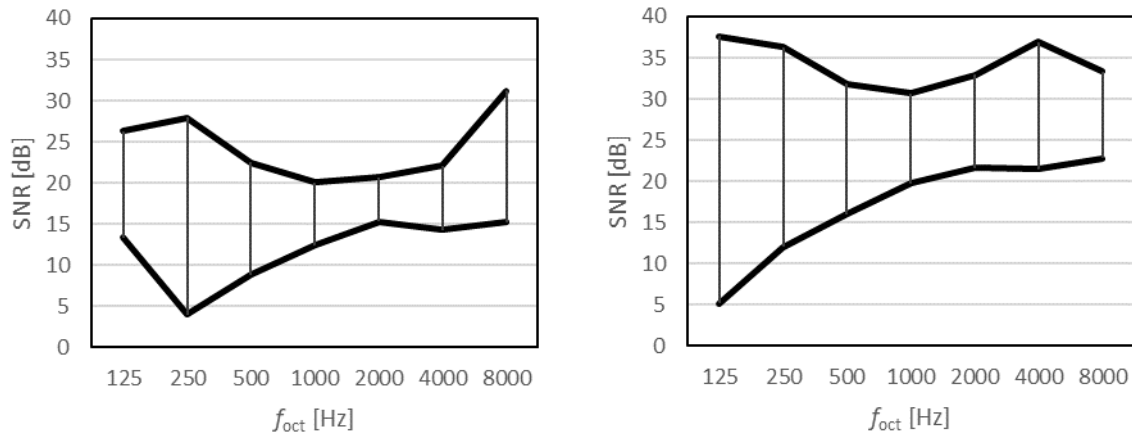
Kuva 2. STIPA-mittaustulokset, STIPA-signaalin äänenpainetason vaihteluväli asemalaitureilla.

Savunpoiston äänenpainetason vaihteluväli lyhyelle ja pitkälle savunpoistoreitille on esitetty kuvassa 3. Lyhyen savunpoistoreitin keskiäänitason vaihteluväli on $L_{A,\text{eq}} = 60 \dots 74$ dB ja pitkän $L_{A,\text{eq}} = 50 \dots 67$ dB.



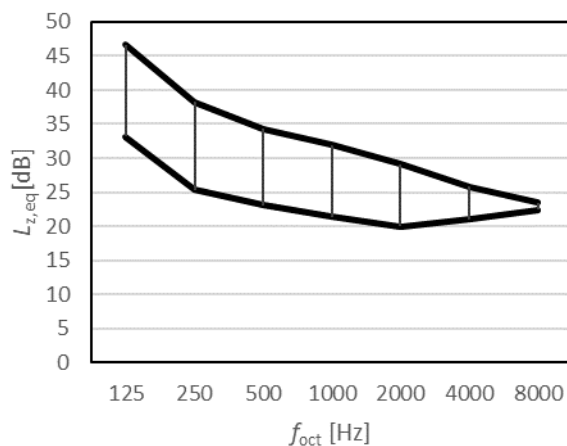
Kuva 3. Savunpoiston äänenpainetasomittaustulokset – vasemmassa kuvaajassa lyhyen savunpoistoreitin äänenpainetason vaihteluväli ja oikeassa pitkän savunpoistoreitin.

STIPA-mittausten STIPA-signaalin ja savunpoiston asemalaiturikohtaisten signaalikohinasuhteiden vaihteluväli on esitetty lyhyelle ja pitkälle savunpoistoreitille oktaavikaistoittain kuvassa 4.



Kuva 4. STIPA-mittaussignaalin ja savunpoiston signaalikohinasuhde taajuuden suhteen oktaavikaistoittain – vasemmassa kuvaajassa lyhyt savunpoistoreitti ja oikeassa pitkä savunpoistoreitti.

Asemalaitureiden STIPA-mittausten aikaisen taustäänitason vaihteluväli on esitetty kuvassa 5 taajuuden suhteen oktaavikaistoittain.



Kuva 5. STIPA-mittausten aikainen taustäänitaso taajuuden suhteen.

Yksittäisten mittauspisteiden vaihteluväli kaikilla laitureilla savunpoiston lyhyellä reitillä on $STIPA = 0,54 \dots 0,68$ ja pitkällä $STIPA = 0,55 \dots 0,69$.

Puheenymmärrettävyydsmittausten asemalaiturikohtaiset keskiarvotulokset ovat lyhyelle savunpoistoreitille $STIPA_{90\%,avrg} = 0,57 \dots 0,64$ ja pitkälle $STIPA_{90\%,avrg} = 0,59 \dots 0,65$.

Suurimman äänitason tuottaneelle savunpoistoreitille ($L_{A,eq} = 74$ dB) laskettiin kyseisen asemalaiturin puheenymmärrettävyytulostulos mittaustuloksista oletuksella, että suunnittelussa olisi arvioitu savunpoiston äänitasoksi ohjearvo $L_A = 65$ dB ja signaalikohinasuhteeksi ohjeistuksen minimiarvo $SNR = 6$ dB, jolloin äänievakuointijärjestelmän tuottama äänitaso asemalaiturilla kuuntelukorkeudessa olisi $L_{A,eq,T} = 71$ dB. Laskentatilanteen signaalikohinasuhde on -3 dB, puheenymmärrettävyytulosten vaihteluväli $STIPA = 0,40 \dots 0,45$ ja keskiarvo $STIPA_{90\%,avrg} = 0,43$. Vastaavalla laskelmalla signaalikohinasuhteella $SNR = 15$ dB taustäänitason ohjearvoon nähden saadaan signaalikohinasuhteeksi 6 dB, vaihteluväliksi $STIPA = 0,52 \dots 0,57$ ja keskiarvoksi $STIPA_{90\%,avrg} = 0,55$.

4. Pohdinta

Jälkikaiunna ollessa taulukon 1 mukainen, signaalikohinasuhteesta riippuen on mahdollista saavuttaa teknisen spesifikaation CEN/EN 54-32 puheenymmärrettävyyden ohjearvot. Tarkasteltujen tilojen jälkikaiunta-aika on oktaavikaistoilla 500 Hz, 1000 Hz ja 2 000 Hz kymmenen prosentin virhemarginaalissa teknisen spesifikaation CEN/TS 54-32 ohjeavasta. Asemalaitureilla signaalikohinasuhde on suuri laitureiden tavanomaiseen taustäänitasoon nähden mutta pienenee huomattavasti savunpoistopuhaltimien käyttötilassa. Savunpoiston reitityksellä on mittaustulosten perusteella merkitystä savunpoiston äänitasoon.

Mittausten perusteella savunpoiston äänitaso asemalaiturilla voi olla ohjearvoja suurempi. Mikäli tällaisessa tilanteessa savunpoiston äänitaso on arvioitu suunnitteluvaiheessa ohjeistuksen ylärajaan $L_A = 65$ dB ja signaalikohinasuhde ohjeistuksen alarajaan $SNR = 6$ dB muodostuu riski, että todellinen signaalikohinasuhde jää pieneksi. Tällöin käytettäessä CEN/TS 54-32 mukaisia puheenymmärrettävyyden ohjearvoja tavoitteena voi tavoite alittua.

Hätäpoistumistilanteen taustäänitason määrittely suunnitteluvaiheessa voi olla tilanteesta riippuen haastavaa. Esimerkit hätäpoistumistilanteen erilaisista taustäänilähteistä äänitasoineen voisivat helpottaa riittävän signaalikohinasuhteen saavuttamista ja näin ollen tuoda varmuutta suunnitteluratkaisun riittävyteen.

Artikkelin asemalaitureiden tilanteessa merkittäviksi taustäänilähteiksi muodostuivat savunpoistopuhaltimet. Asemalaitureiden savunpoistopuhaltimien tuottaman suuren äänitason arvioidaan linkittyvän vahvasti maanalaiseen rakentamiseen ja asemalaiturin suureen tilavuuteen.

5. Yhteenveto

Saatavissa olevilla ohjeistuksilla on mahdollista suunnitella ja toteuttaa ohjearvot täyttävä äänievakuointijärjestelmä. Ohjeistuksissa on esitetty yläraja-arvo hätäpoistumistilanteen taustäänitasolle. On kuitenkin mahdollista, että hätäpoistumistilanteessa on esim. savunpoistopuhaltimia, jotka tuottavat tätä suuremman äänitason. Tällaisessa tilanteessa signaalikohinasuhde voi jäädä suunniteltua pienemmäksi ja äänievakuointijärjestelmän puheenymmärrettävyys kuuntelukorkeudessa alittaa tavoitteet. Esimerkkien lisäys erilaisista taustäänilähteistä ja niiden äänitasoista saatavissa oleviin ohjeisiin parantaisi varmuutta riittävän suunnitteluratkaisun tuottamiseksi.

Lähdeluettelo

- [1] CEN/TS 54-32:2015. 2015. Fire detection and fire alarm systems – Part 32: Planning, design, installation, commissioning, use and maintenance of voice alarm systems. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [2] SFS-EN IEC 60268-16:2020. 2000. Sound system equipment – Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [3] ISO 3382-2:2008. 2008. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. International Organization for Standardization.

Kevytrakenteisten hallimaisten tilojen ääniympäristö

Erkki Honkakoski¹, Lauri Talus², Jesse Lietzén² ja Mikko Matalamäki²

¹ Ruukki Construction Oy, Building Envelopes, Research and development

² A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Hallimaisten tilojen suunnittelussa tilojen ääniympäristöä ei usein oteta huomioon riittäväällä laajuudella. Jo suunnitteluvaiheessa on syytä tarkastella sekä tilojen huoneakustiikkaa että rakennuksen ulkokuoren ääneneristävyyttä. Jälkikaiunta-ajan arviointiin ja huoneakustiikan suunnitteluun voidaan käyttää Sabine kaavaa. Sabine kaava ei kuitenkaan huomioi ääntä vaimentavan materiaalin epätasaista jakautumista tilassa, eikä sitä ole tarkoitettu erityisen suurten tilojen jälkikaiunta-ajan tarkasteluun. Jälkikaiunta-ajan arvioinnin epävarmuutta havainnollistetaan vertaamalla laskennallista arvioita esimerkkikohteessa suoritettuun jälkikaiunta-ajan mittaukseen. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyttä voidaan tarkastella laskennallisesti RIL 243-1 äänitasoeromenetelmällä, joka ottaa huomioon julkisivun eri osien ääneneristävyyden. Vaimentavan materiaalin määrän vaikutusta ulkovaipan äänitasoeroon tarkasteltiin laskennallisesti.

1. Johdanto

Suurikokoisissa, hallimaisissa tiloissa kiinnitetään usein huomiota tehokkaaseen materiaalinkäyttöön, asennuksen nopeuteen ja kokonaiskustannuksiin. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi urheilu-, jääkiekko- ja monitoimihallit, tehdasrakennukset, varasto- ja terminaalarakennukset sekä erilaiset kauppatilat, kuten supermarketit tai autokauppojen tilat. Tällaisissa kohteissa julkisivun ääneneristävyyteen kiinnitetään huomiota, mutta sisätilojen huoneakustiikka saattaa jäädä huomiotta. Suurissa kohteissa huoneakustiikan jälkiasennus voi aiheuttaa suuria kustannuksia, joten jo suunnitteluvaiheessa on hyödyllistä tarkastella rakennuksen kuoren huonevaimennusratkaisuja osana ulkokuoren ääneneristävyyttä. Ruukin tuotekehityksessä optimoitiin kantavuuden ja ääneneristävyyden kannalta kustannustehokkaita vaihtoehtoja kevyille teräsrakenteille, joissa sisäpinnan äänenvaimennus on integroitu kantavaan rakenteeseen.

Artikkelissa esitetään laskennallisia tarkasteluja Ruukin perforoiduilla poimulevytuotteilla saavutettavasta jälkikaiunta-ajasta. Laskelmat perustuvat mitattuihin absorptiosuhteisiin. Jälkikaiunta-ajan arviointiin on julkaistu selainsovellus, jossa on käytetty mitattuja absorptiosuhteita materiaaleille- ja rakenteille. Sovellus käyttää Sabine kaavaa, joka ei ota huomioon vaimennuksen jakautumista huoneen pinnoilla. Laskennallinen arvio eroaa hieman todellisesta arviosta, jos vaimennus on epätasaisesti jakautunut, esimerkiksi jos vaimennus on pääasiassa vain katossa. Laskennan epätarkkuutta tarkasteltiin pilottikohteessa (Padel-halli Seinäjoella) mitattuihin tuloksiin vertaamalla. Jälkikaiunta-ajan lisäksi tarkasteltiin laskennallisesti ääntä vaimentavien sisäpintojen vaikutusta rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyteen.

2. Materiaalit ja menetelmät

2.1 Perforoitujen poimulevyjen äänenabsorptio

Materiaalin kykyä vaimentaa siihen kohdistuvaa ääntä kuvataan absorptiosuhteella α . Absorboivien materiaalin luokitteluun voidaan käyttää myös nk. absorptioluokkia A–E, joista A on paras luokka ja E heikoin. Absorptiosuhde määritellään materiaalin pintaan kohdistuvan ja materiaalin absorboiman äänitehon suhteena. Ääntä absorboivia pintoja ovat esimerkiksi huokoiset materiaalit, perforoidut eli rei'itetyt levyt sekä levyresonaattorit.

Katto- ja seinätuotteiden äänenabsorptiota mitattiin Turun ammattikorkeakoulun akustiikkalaboratoriossa standardin ISO 354 mukaisesti. Lisäksi seinätuotteiden ilmäeneristävyyttä mitattiin standardin ISO 10140-2 mukaisesti. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 1 sekä julkaistu Ruukin verkkosivuilla [1] ja tuoteluetteloissa.

Kattorakenteet 1–6 koostuvat perforoidusta poimulevystä, jonka taustalla on mineraalivillaa. Akustisella lisärakenteella tarkoitetaan poimulevyn onteloiden täyttämistä muotoon leikatuilla mineraalivillakappaleilla. Seinärakenteet 1 ja 2 ovat pelti-villa-pelti (PVP) elementin pintaan asennettavia, niin ikään perforoiduista poimulevyistä valmistettuja vaimennusratkaisuja.

Taulukko 1. Mitatut absorptiosuhteet ja ilmäeneristysluvut [1].

Rakenne	Rakennekerrokset	Absorptio- luokka (ISO 11654)	Painotettu absorptiosuhde α_w (ISO 11654)	Ilmäeneris- tysluku R_w (ISO 717-1)
Tausta	- Mineraalivilla 30 mm - Höyrynsulku - Mineraalivilla 290 mm	-	-	-
Katto 1	- T130M 3/15 (perf. 15 %) - Taustarakenne	D	0,35	-
Katto 2	- T130M 3/15 (perf. 15 %) - Kuitukangas - Akustinen lisärakenne - Taustarakenne	D	0,45	-
Katto 3	- T20 4/30 (perf. 30 %) - Kuitukangas - Kattorakenne 2	C	0,70	-
Katto 4	- T153 4/30 (perf. 30 %) - Taustarakenne	B	0,80	-
Katto 5	- T153 4/30 (perf. 30 %) - Kuitukangas - Akustinen lisärakenne - Taustarakenne	A	0,90	-
Katto 6	- T20 4/30 (perf. 30 %) - Kuitukangas - Kattorakenne 5	A	1,00	-
Seinä 1	- SPA 150E PVP-elementti - Paroc Extra F 50 mm - Design Tokyo S18 (perf. 30 %)	D	0,50	35 dB
Seinä 2	- SPA 150E PVP-elementti - Paroc Extra F 100 mm - Design Tokyo S18 (perf. 30 %)	A	0,90	39 dB

2.2 Jälkikaiunta-aika

2.2.1 Laskennallinen arviointi

Tilan jälkikaiunta-aikaa voidaan arvioida käyttäen Sabinen kaavaa, joka ottaa huomioon vaimentavien pintojen pinta-alan huoneessa sekä huoneen tilavuuden. Sabinen kaava perustuu olettamukseen kuutiomaisesta, melko pienestä tilasta, jossa vaimentava materiaali on jakautunut tasaisesti huoneen pinnoille. Ruukki on kehittänyt Sabinen kaavaan perustuvan laskentaohjelmiston, jolla pystytään arvioimaan tarvittavaa vaimentavan materiaalin määrää tilassa [2].

2.2.2 Jälkikaiunta-ajan mittaus ja pilottikohde

Pilottikohteessa mitattiin jälkikaiunta-aika katkaistun kohinan menetelmällä standardin ISO 3382-2 mukaan 125–4000 Hz taajuusalueella. Jälkikaiunta-ajan mittauksissa äänilähteenä käytettiin kaiutinta, johon oli kytketty vaaleanpunaista kohinaa tuottava kohinageneraattori. Pilottikohde on Seinäjoella sijaitseva padel-halli, jonka sisämitat ovat n. 60 x 47 x 13 metriä. Pilottikohteessa suoritettiin jälkikaiunta-ajan mittaukset 13.1.2022 sekä 19.8.2022. Hallin seinät olivat heijastavia ja katto Ruukin T153 AcuB 4/30 perforoitua poimulevyrakennetta (ks. taulukko 1). Rakennuttajan, käyttäjien ja rakentajien kokemuksia kohteesta on kerätty haastatteluin, jotka on julkaistu Ruukin verkkosivuilla [3].

Ensimmäisessä mittauksessa Padel-kenttien alueen lattiat olivat kumimaista materiaalia, muuten lattia oli betonia. Hallin kentät oli reunustettu n. 2,5 metriä korkeilla akryylilevyillä. Jälkimmäisessä mittauksessa noin 15 m² tulostettu seinämainos parvitilassa muutettiin pinnalta ilmaa läpäiseväksi ja taustaltaan ääntä vaimentavaksi. Lisäksi tilaan oli lisätty reikäpeltipinnoitus, jonka taustalla oli villaa n. 70 m². Käytävillä ja yleisille alueille oli lisätty lattiamatto, ja kahvioon ja parvelle huonekaluja, joista osa oli pehmeitä.

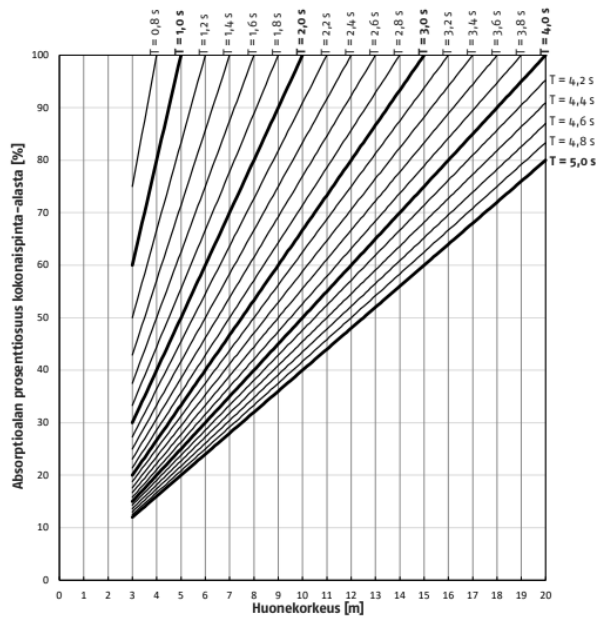
2.3 Ulkovaipan ääneneristävyys

Huoneen äänenabsorption vaikutusta ulkovaipan ääneneristävyyteen tarkasteltiin soveltamalla julkaisussa RIL 243-1 [4] esitettyä äänitasoeromenetelmää. Laskentamallilla tarkasteltiin eri kokoisten, suorakaiteenmuotoisten hallirakennusten julkisivujen äänitasoeroa $\Delta L_{A,eq}$ erilaisilla ulkoseinärakenteilla ja sisäpinnoilla. Ääntä vaimentavien lisäkerrosten lisääminen ulkoseinärakenteeseen parantaa seinärakenteen itsensä ilmaääneneristävyyttä. Lisäksi huonetilan äänenabsorption kasvattaminen pienentää vaimentaa tilaan syntyvää äänikenttää, mikä kasvattaa ulko- ja sisäpuolen välistä äänitasoeroa.

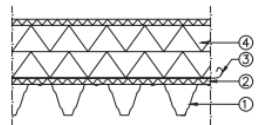
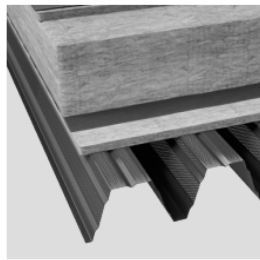
3. Tulokset

3.1 Jälkikaiunta-ajan arviointi

Kuvassa 1. on esitetty laskennallinen arvio tilan jälkikaiunta-ajasta vaimentavan materiaalin määrän ja tilan korkeuden funktiona. Kuvassa 1 vaimentavana materiaalina on käytetty taulukossa 1 esitettyä kattorakennetta 4. Muille taulukossa 1 esitetyille kattorakenteille on esitetty vastaavat kuvaajat suunnitteluohjeessa [1].



Ruukki LBS T153 4/30 (uuma- ja laippaperfointi)
Äänen absorptioluokka B, α_w 0,8



1. T153 (perforointi 30 %)
2. Mineraalivilla (30 mm)
3. Höyrynsulku
4. Mineraalivilla (yhteensä 290)

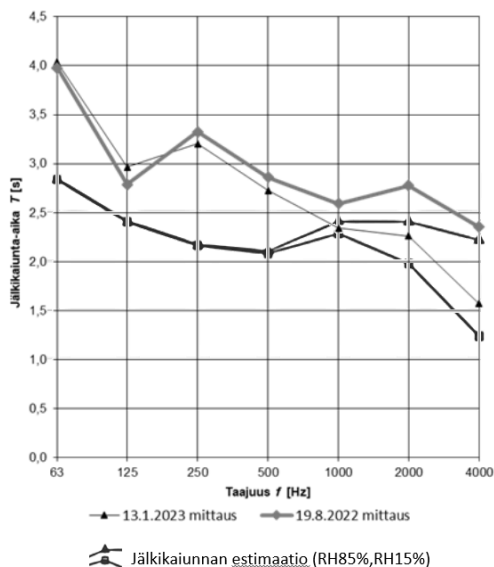
Äänen absorptioarvot, kun eristeen paksuus on 130-400 mm

f [Hz]	α_1 1/3	α_2 1/3	α_3 1/3
100	0,57		
125	0,53	0,61	0,60
160	0,54		
200	0,59		
250	0,75	0,76	0,75
315	0,83		
400	0,85		
500	0,88	0,84	0,85
630	0,89		
800	0,76		
1000	0,73	0,75	0,75
1250	0,75		
1600	0,76		
2000	0,76	0,77	0,75
2500	0,78		
3150	0,75		
4000	0,74	0,72	0,70
5000	0,66		

Kuva 1. Ääntä vaimentavalla kattorakenteella saavutettava jälkikaiunta käytetyn pinta-alan ja huonekorkeuden funktiona, sekä kuvaan liittyvä rakenne.

3.1.1 Laskennallinen ja mitattu jälkikaiunta-aika pilottikohteessa

Kuvassa 2 on esitetty pilottikohteessa mitatut jälkikaiunta-ajat, sekä Ruukin laskentatyökalulla määritetty laskennallinen arvio kahdella eri ilmankosteuden arvolla.



Kuva 2. Pilottikohteen rakennusvaiheessa ja valmiissa rakennuksessa mitattu sekä laskennallinen jälkikaiunta-aika.

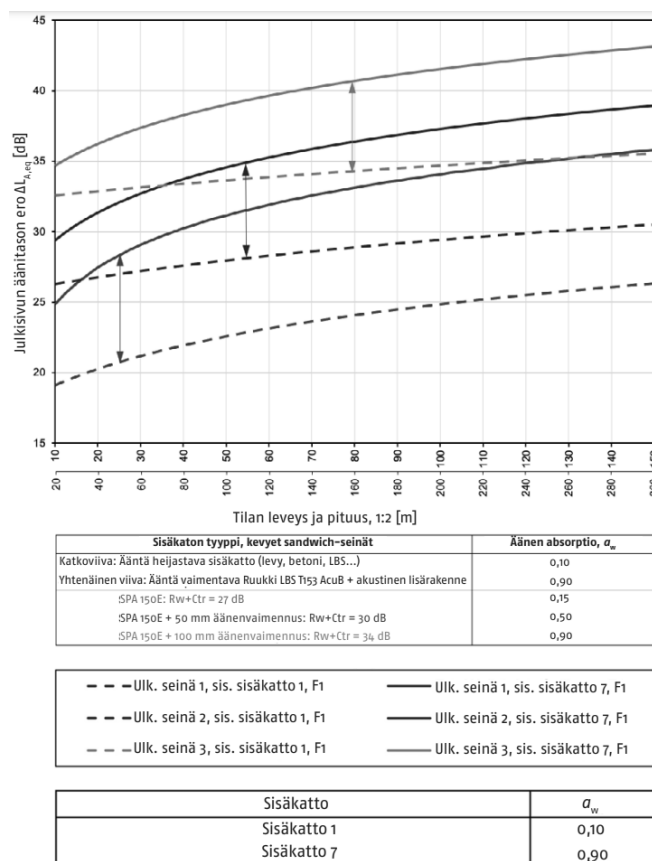
Kuvasta 2 nähdään, että mitatut ja laskennalliset tulokset eivät täysin vastaa toisiaan. Sabinen kaavassa tilan kokonaisabsorptioalan oletetaan olevan tasaisesti jakautunut tilan pinnoille. Jos vaimentavat pinnat ovat jakautuneet hyvin epätasaisesti tilassa huoneen äänikenttä ei ole diffuusi ja laskenta antaa liian optimistisen tuloksen. Mitatussa hallirakennuksessa suurin osa vaimentavasta materiaalista sijaitsi tilan katossa. Jälkikäiunta-ajan laskennallisen arvion tarkkuutta voitaisiin mahdollisesti parantaa käyttämällä Fitzroy'n laskentamallia, joka antaa tarkempia tuloksia tilanteissa, joissa absorptiomateriaali on epätasaisesti jakautunut tilaan [5]. Vuonna 2000 on myös esitetty parannusta Fitzroy'n malliin, jota on kokeiltu ja raportoitu julkaisussa [6].

3.2 Äänenvaimennuksen vaikutus ulkovaipan ääneneristävyyteen

Kuvassa 3 on esitetty eri kokoisten tilojen julkisivun laskennallinen äänitasoero kolmella eri seinärakenteella:

- sandwichelementti SPA 150 E
- Seinärakenne 1 (ks. taulukko 1)
- Seinärakenne 2 (ks. taulukko 1)

Kutakin julkisivurakennetta tarkasteltiin sekä ääntä heijastavalla ($\alpha = 0,10$), että ääntä vaimentavalla ($\alpha = 0,90$) kattorakenteella.



Kuva 3. Julkisivun äänitason ero tilassa, jossa on käytetty SPA150E seinäelementin kolme variaatiota. Nuolet ilmaisevat vaimentavalla katolla saavutettavaa parannusta.

Kuvasta 3 nähdään, että ääntä vaimentavan rakenteen lisäyksellä saavutettava parannus ulkoseinän ilmajäneneristyslukuun on merkittävä myös julkisivun äänitasoero $\Delta L_{A,eq}$ kannalta.

Lisäksi kuvasta nähdään, että huonetilan äänenabsorptiota kasvatettaessa julkisivun laskennallinen äänitasoero $\Delta L_{A,eq}$ kasvaa huomattavasti.

4. Yhteenveto

Suurten hallitilojen suunnittelussa kiinnitetään usein huomiota tehokkaaseen materiaalinkäyttöön, asennuksen nopeuteen ja kokonaiskustannuksiin. Tilat ovat usein aktiivisia luonteeltaan ja tilan toiminta tuottaa runsaasti ääntä. Rakennushankkeiden toteuttamisessa korostuu rakennuskomponenttien äänen eristyksen varmistaminen, mutta myös tilojen huoneakustiikkaan on syytä kiinnittää huomiota.

Akustisten sisäolosuhteiden parantaminen on mahdollista kustannustehokkaasti myös suurten tilojen suunnittelussa jo rakenteiden valintavaiheessa. Kun ääneneristyksen lisäksi myös huonevaimennus otetaan huomioon aikaisessa vaiheessa ja parhaimmillaan integroidaan rakenteeseen, voidaan vähentää materiaalimenekkiä, edistää kestävä kehitystä ja samalla varmistua tilojen toimivasta huoneakustiikasta.

Ruukin tuotekehityksessä kuorirakenteeseen optimoitiin kantavuuden ja äänen vaimennuksen suhteen integroituvia, kustannustehokkaita ratkaisuja kevyille teräsrakenteille. Tuotteiden akustiset ominaisuudet mitattiin Turun ammattikorkeakoulun toimesta. Mitattuja arvoja hyödynnettiin jälkikäiunta-ajan laskennallisissa tarkasteluissa sekä Ruukin jälkikäiunta-ajan laskentatyökalun kehittämiseksi. Lisäksi tarkasteltiin laskennallisesti huonevaimennuksen vaikutusta rakennuksen julkisivun ääneneristävyyteen. Laskennalliset tarkastelut toteutettiin A-insinöörit Suunnittelu Oy:n toimesta.

Lähdeluettelo

- [1] Ruukin® ääniympäristöratkaisu – Suunnitteluohjeet. (Viitattu 14.8.2023). Saatavilla: <https://www.ruukki.com/sound-environment>
- [2] Ruukki Acoustic Estimator, (Viitattu 14.8.2023) Saatavilla: <https://acousticconfigurator.3dtalo.fi/>
- [3] Verkkajulkaisu: Ruukki® ääniympäristöratkaisu Suomen pilottikohteessa kerää kiitosta (viitattu 14.8.2023). Saatavilla: <https://www.ruukki.com/fin/tietoa-meist%C3%A4/news-blogs-and-social-media/news-blogs-events-social-media/07-06-2023-ruukki-%C3%A4%C3%A4niymp%C3%A4rist%C3%B6ratkaisu-suomen-pilottikohteessa-ker%C3%A4%C3%A4-kiitosta>
- [4] Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.
- [5] Fitzroy, D. 1959. Reverberation formulae which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption. Journal of the acoustical society of America, vol. 31, s. 893–897.
- [6] Neubauer, O. 2000. Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non uniformly distributed absorption using a modified Fitzroy equation. Seventh international congress on sound and vibration, Saksa.

B10. Melun ja värähtelyn torjunta

ECOSAFE 2 – Luonnonmukaisten materiaalien käyttö puurankarakenteisissa ääntä eristävissä rakenteissa

Jesse Lietzén, Ville Kovalainen ja Mikko Kylliäinen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

ECOSAFE 2 -hankkeen akustiikan osatutkimuksessa selvitettiin savetetun kutterilastun ja savirappauksen soveltuvuutta käytettäväksi ääntä eristävissä ulkovaipparakenteissa ja huoneiston välisissä seinissä. Tutkimuksessa määritettiin laskennallisesti kolmen huoneiston välisen seinän, 36 ulkoseinän ja 32 yläpohjan ilmajääleneristävyyttä. Rakenteissa eristeenä ja ääntä absorboivana materiaalina toimi savetettu kutterilastu ja savirappausta käytettiin pääasiassa sisäverhousmateriaalina. Laskennallisen tutkimuksen lähtötiedoiksi teetettiin materiaalien akustisten ominaisuuksien laboratoriomittaukset. Tutkimuksen perusteella akustiikan näkökulmasta savirappauksella on potentiaalia toimia ilmajääleneristävyyttä parantavana materiaalina ja savetettu kutterilastu soveltuu rakenteiden absorptiomateriaaliksi.

1. Johdanto

ECOSAFE-tutkimushankkeen jatkohankkeessa ECOSAFE 2 selvitettiin luonnonmukaisten materiaalien teknistä ja mikrobiologista toimivuutta nykyaikaisissa puurankarakenteisissa ulkovaipparakenteisissä keskittyen erityisesti savetettuun kutterinlastuun ja saveen. Materiaalien käyttö mahdollistaa teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämisen rakentamisessa ja rakenteiden alhaisen hiilijalanjaljen. Lisäämällä savea kutterinlastueristeseen voidaan pienentää materiaalin homehtumisherkkyttä ja parantaa eristeen paloteknisiä ominaisuuksia. Tavoitteena luonnonmukaisten, kotimaisten raaka-aineiden hyödyntämisessä on edistää ekologisesti kestävää ja terveellistä rakentamista.

Yhdessä ECOSAFE 2 -hankkeen osatutkimuksista selvitettiin ulkovaipparakenteiden sekä huoneiston välisten seinien ääneneristävyyttä. Tutkimuksessa toteutettiin laskennallisia ääneneristystarkasteluja hyödyntäen parametrissa ilmajääleneristävyyden laskentamallia. Tavoitteena tällä oli selvittää, millä tavoin savetettua kutterinlastua ja savirappausta hyödyntämällä voidaan saada aikaan nykyiset ääneneristystavoitteet täyttävät rakenteet. Tutkimuksen lähtötiedoksi teetettiin savetetun kutterinlastun ja savirappauksen akustisten ominaisuuksien laboratoriomittaukset. Osatutkimuksen tulokset on kokonaisuudessaan esitetty raportissa [1].

2. Materiaalit ja menetelmät

2.1 Määräykset ja ohjeavot

Tutkittuja rakenteita koskevat ääneneristysmääräykset voidaan jakaa kahteen osaan. Näistä ensimmäinen koskee vaatimusta huoneistojen väliselle ilmajääleneristävyydelle. Ympäristöministeriön asetuksen rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017 [2] mukaan pienin sallittu standardoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ asuntojen välillä on 55 dB. Vaatimus ottaa huomioon äänen siirtymisen tilasta toiseen sekä tiloja erottavan rakenteen kautta että äänen sivutiesiirtymänä. Rakenteiden ilmajääleneristävyyttä ilmoitetaan pääsääntöisesti

ilmääneneristyslukuna R_w , joka kuvastaa äänen siirtymistä ainoastaan tutkittavan rakenteen kautta. Näin ollen rakenteen ilmäääneneristysluvun R_w perusteella ei voida suoraan arvioida äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ vaatimuksen täyttymistä, vaan suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös sivutiesiirtymät. Tämä edellyttää muun muassa liitosdetaljien ja sivuavien rakenteiden huolellista suunnittelua.

Toiseksi, rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyysvaatimus esitetään normaalisti asemakaavassa äänitasoerovaatimuksena $\Delta L_{A,vaad}$. Asemakaavassa annettu vaatimus tarkoittaa rakennuksen julkisivuun kohdistuvan ja sisällä sallittavan äänitason erotusta. Sisällä sallitut äänitasot on esitetty valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 melutason ohjearvoista [3]. Tyypillisesti julkisivulla äänitasoerovaatimus liikennemelua vastaan on luokkaa 30–35 dB.

Ulkovaipparakenteiden ääneneristävyys ilmoitetaan taas spektripainotettuna ilmäääneneristyslukuna, kuten $R_w + C_{tr}$, joka ei ole sama kuin ulkovaipalta vaadittava äänitasoero $\Delta L_{A,vaad}$. Tämä johtuu siitä, että ääni siirtyy ulkoa sisään rakennuksen ulkovaipan kaikkien rakennusosien kautta. Mitä suurempi rakennusosan pinta-ala on, sitä enemmän ääntä sen kautta siirtyy ulkoa sisään. Sisälle siirtynyt ääni lisäksi vaimenee tavallisesti sitä enemmän, mitä suurempaan tilaan se on siirtynyt. Ulkovaipan ääneneristys mitoitetaan laskennallisesti, esim. RIL 243-1 [4] esitetyllä menetelmällä. Kokemusperäisesti voidaan kuitenkin todeta, että liikennemelualueilla ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden ilmäääneneristysluvun tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ tulee olla vähintään 40 dB, mutta tyypillisesti tarvittava arvo on 44–46 dB.

2.2 Laboratoriomittaukset

Tutkimuksen lähtötiedoiksi määritettiin savetetun kutterinlastun ja savirapatun vinolaudoitetun levyn sekä savirapatun vanerilevyn akustisia ominaisuuksia laboratoriomittauksin. Mittaukset suoritettiin Turun ammattikorkeakoulun akustiikkalaboratorio. Standardin ISO 354:2003 mukaan tehtyjen akustisen absorptiosuhteen mittausten [5] perusteella 100 mm paksun savetetun kutterinlastueristeen painotettu akustinen absorptiosuhde α_w oli 1,0. Tulosten perusteella materiaali toimii hyvin ääntä absorboivana kerroksena. Standardin SFS-EN-ISO 10140-2:2010 mukaan suoritettujen ilmäääneneristävyyden mittausten [6] perusteella savirapatulle vinolaudoitetulle levyllä ja savirapatulle vanerilevyllä standardin ISO 717-1:2013 mukaan määritetyt ilmäääneneristysluvut R_w olivat 33 ja 41 dB. Paljaaseen 21 mm paksuun vinolaudoitettuun levyyn ja 16 mm vanerilevyyn nähden ilmäääneneristysluku nousi 12 ja 18 dB, kun levyjen päälle asennettiin 30 mm paksuinen savirappaus.

2.3 Tutkitut rakenteet ja materiaaliominaisuudet

Tutkimuksessa tarkasteltiin huoneiston välisiä seiniä (HVS, 3 kpl), ulkoseiniä (US, 36 kpl) ja yläpohjia (YP, 32 kpl). Huoneiston väliset seinät olivat kaksinkertaisia, toisistaan irrallisilla puurangoilla varustettuja seiniä, joissa oli pintarakenteena savirappaus joko vinolaudoituksen tai havuvanerin päällä. Seinän sisällä oli savettua kutterilastua absorboimassa ilmavälin kaiuntaa. Ulkoseinät olivat tuulettuvia puurankaseiniä, joissa oli julkisivuverhouksena ulkoverhouslauta. Tuuletusvälissä oli puukuitupohjainen tuulensuojaeriste. Seinäverhouksena toimivat savirapattu vanerilevy, savirapattu ristiinlaminoitu puulevy (CLT), kipsilevykerros ja sisäverhouslauta. Eristeenä rakenteissa toimi savetettu kutterinlastu. Yläpohjarakenteet olivat joko ristikko- tai palkkirakenteisia, joissa lämmöneristeenä käytettiin savetettua kutterilastua. Vesikatteenä oli joko saumattu peltikate tai tiilikate. Sisäverhoukset olivat pääosin vastaavat kuin ulkoseinissä.

Tutkitut rakennetyypit olivat seuraavat:

HVS1.1 / 1.2

- 15 / 30 mm savirappaus
- 15 mm havuvaneri
- 66 mm puuranka k600, välissä savetettu kutterilastu
- 20 mm ilmaväli, välissä savetettu kutterilastu
- 66 mm puuranka k600, välissä savetettu kutterilastu
- 15 mm havuvaneri
- 15 / 30 mm savirappaus

HVS2

- 30 mm savirappaus
- 21 mm vinolaudoitus
- 66 mm puuranka k600, välissä savetettu kutterilastu
- 20 mm ilmaväli, välissä savetettu kutterilastu
- 66 mm puuranka k600, välissä savetettu kutterilastu
- 21 mm vinolaudoitus
- 30 mm savirappaus

US1 / 2

- 23 mm ulkoverhouslauta
- 25 mm tuuletusväli, koolaus k600
- 25 mm puukuitupohjainen tuulensuojalevy, esim. Hunton / tuulensuojajeriste
- 300 mm pystyranka k600, välissä savetettu kutterilastu 300 mm
- sisäverhous

US3

- 23 mm ulkoverhouslauta
- 25 mm tuuletusväli, koolaus k600
- 25 mm tuulensuojajeriste
- 300 mm sik-sak pystyranka k600, välissä savetettu kutterilastu 300 mm
 - pystyrangat kytketty toisiinsa yhteisillä ylä- ja alajuoksuilla
- sisäverhous

YP1 / 3

- 0,5 mm konesaumattu peltikate / 20 mm tiilikate
- 50 mm korokepuut ja ruoteet
- 25 mm puukuitupohjainen aluskatelevy, esim. Hunton Sarket
- väh. 800 mm kantava ristikkorakenne k900, välissä savetettu kutterilastu 600 mm
- sisäverhous

YP2 / 4

- 0,5 mm konesaumattu peltikate / 20 mm tiilikate
- 100 mm tuuletettu ilmaväli, korokepuut ja ruoteet
- 25 mm puukuitupohjainen aluskatelevy, esim. Hunton Sarket
- 600 mm kantava palkkirakenne k900, välissä savetettu kutterilastu 600 mm
- sisäverhous

YP5 oli rakenteena kuten YP1, mutta aluskatelevy korvattu 30 mm paksuisella XPS-levyllä.

Laskennassa käytetyt oleelliset materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 1. Savirappauksen ja vanerin materiaaliparametrit määritettiin ilmaääneneristävyuden laskentamallilla (ks. kohta 2.4) soveltamalla laskentatulokset laboratoriomittausdataan [5, 6]. Savetetun kutterilastun absorptiosuhteen arvona käytettiin sille saatua mittaustulosta [5].

Taulukko 1. Käytettyjen materiaalien tiheydet ja kimmokerroimet.

Materiaali	Tiheys ρ	Kimmokerroin E
Savirappaus	1440 kg/m ³	2900 MPa
Vaneri	410 kg/m ³	2800 MPa
Sisäverhouslauta	350 kg/m ³	7000 MPa
Puukuitupohjainen aluskatelevy, esim. Hunton Sarket	260 kg/m ³	120 MPa
Puukuitupohjainen tuulensuojalevy, esim. Hunton	252 kg/m ³	120 MPa
XPS	30 kg/m ³	12 MPa

2.4 Ilmaääneneristyslukujen laskenta

Käytetyn laskentamallin ominaisuudet on esitetty lähteessä [7]. Laskentamalli on parametrinen ja perustuu lähteisiin [8–16]. Laskentamallilla voidaan ottaa huomioon rakenteen rakennekerrosten massa ja jäykkyys, mahdollisissa ilmapäleissä olevat ääntä vaimentavat materiaalit, rankarunkoisen seinän rankojen joustavuudet sekä eristerapatun ulkoseinän resonanssin. Laskentamallin validoinnista ja tarkkuudesta on esitetty arvio lähteessä [7]. Laskentatarkkuus vastaa lähteissä [14] ja [17] esitettyjä vastaavien mallien tarkkuutta. Kaikkien laskentamallien tarkkuus riippuu siitä, kuinka monimutkainen rakenne on kyseessä: mitä useampi rakennekerros rakenteessa on, sitä enemmän mittaus- ja laskentatulokset yleensä eroavat toisistaan.

Todellisen yläpohjarakenteen ääneneristävyteen ympäristömelua vastaan voi vaikuttaa myös räystäsratkaisu. Avoimen räystään tapauksessa ääneneristävyys voi heikentyä, kun ääni pääsee kulkeutumaan rakenteen ilmapäleihin. Tämän ilmiön vaikutus ääneneristävyteen on tapauskohtainen, mutta sen syntymistä voi vähentää ns. ääniloukun avulla, jolla vaimennetaan rakenteen väliin kulkeutuvaa ääntä (ks. esim. RIL 129). Ilmaääneneristävyyslaskelmissa on oletettu, että räystään kautta kulkeva ääni ei heikennä ääneneristävyttä merkittävästi.

3. Tulokset

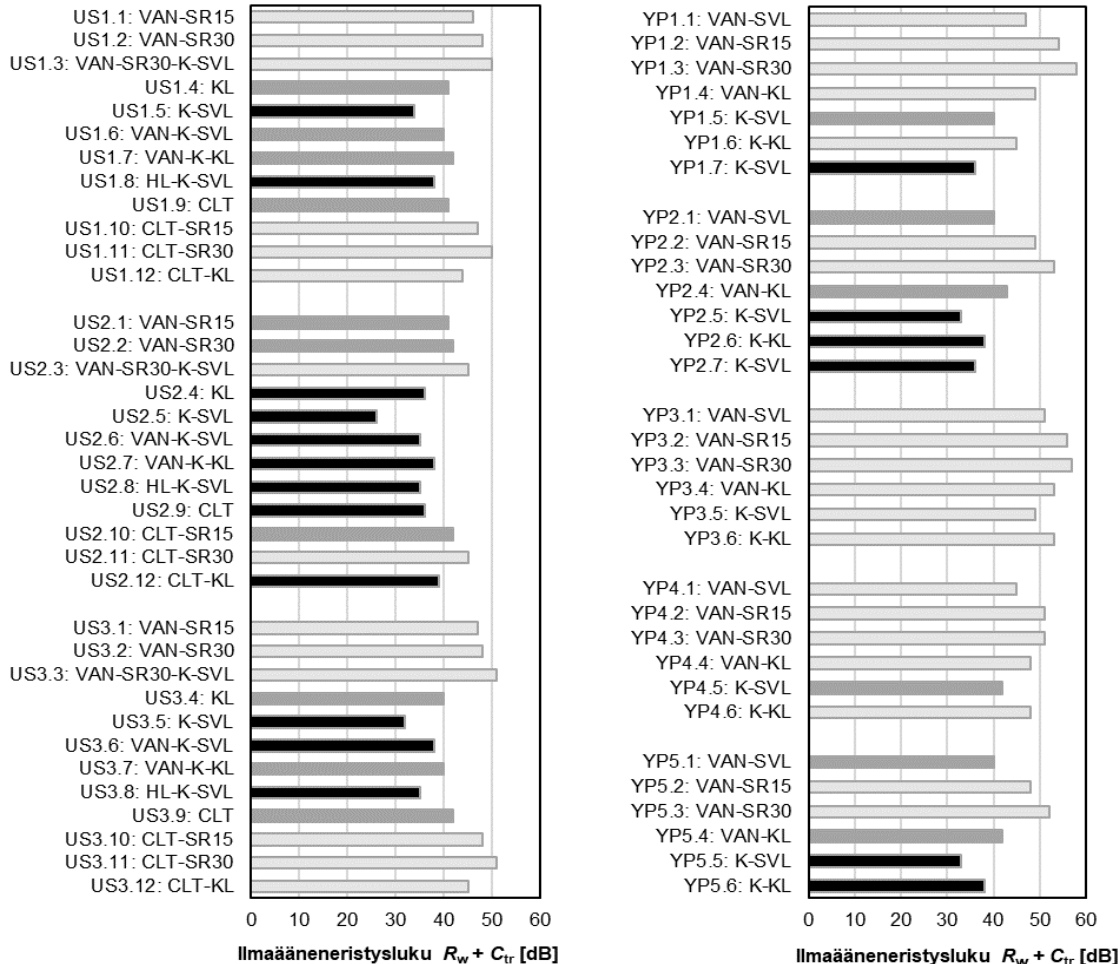
Huoneistojen välisille seinille laskennallisesti määritetyt ilmaääneneristysluvut R_w , $R_w + C$ ja $R_w + C_{tr}$ on esitetty taulukossa 2. Kuvassa 1 on esitetty ilmaääneneristysluvun $R_w + C_{tr}$ tulokset ulkoseinille ja yläpohjille. Lisäksi kuvassa on esitetty rakennetyyppien sisäverhoiluvariaatiot. Sisäpuolisten rakenteiden tapauksessa on käytetty seuraavia lyhenteitä:

- K = Koolaus
- SVL = Sisäverhouslauta 14 mm
- VAN = Vaneri 15 mm
- SR15/30 = Savirappaus 15 mm tai 30 mm
- CLT = 120 mm ristiinlaminoitu massiivipuulevy
- KL = Kipsilevy 13 mm
- HL = Huokoinen puukuitulevy (Tuulileijona) 12 mm

Esitetyt ilmaääneneristävydet ovat laskennallisia ja tulokset koskevat vain tarkasteltuja rakennetyyppejä. Laskennan tuloksia kokonaisilla rakenteilla ei ole validoitu vertaamalla niitä laboratoriossa tehtyjen ääneneristysmittausten tuloksiin. Materiaalien muuttaminen johtaa muutokseen myös ilmaääneneristävydessä.

Taulukko 2. Lasketut ilmajääneneristysluvut huoneistojen välisille seinärakenteille.

Rakennetyyppi	R_w	$R_w + C$	$R_w + C_{tr}$
HVS1.1	71 dB	66 dB	59 dB
HVS1.2	80 dB	76 dB	69 dB
HVS2.1	62 dB	60 dB	53 dB



Kuva 1. Ulkoseinille (vas.) ja yläpohjille (oik.) lasketut ilmajääneneristysluvut tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$. Palkkien väritys riippuen rakenteen ilmajääneneristysluvusta $R_w + C_{tr}$: alle 40 dB musta, 40–43 dB tummanharmaa, vähintään 44 dB vaaleanharmaa.

4. Johtopäätökset

Laboratoriomittausten perusteella savetettu kutterilastu on hyvin ääntä absorboivaa ja akustiikan näkökulmasta materiaali soveltuukin erinomaisesti vaimentamaan ääntä rakenteiden kaviteeteissa. Materiaalin akustinen suorituskyky on verrattavissa tavanomaisiin kaupallisiin mineraalivillaeeristeisiin.

Laskennallisen tarkastelun tulosten perusteella savirapattu vinolaudoitus tai savirapattu vaneri soveltuu käytettäväksi huoneiston välisessä ääntä eristävässä seinärakenteessa. Rakenteille lasketut ilmajääneneristysluvut R_w olivat 62–80 dB. Näin ollen kaikilla tutkituilla HVS-rakenteilla on saavutettavissa huoneistojen välinen äänitasoerovaatimus. Ulkoseinärakenteiden tapauksessa jo 15 mm paksun savirappauksen käyttö lisää rakenteen ilmajääneneristävyttä merkittävästi, jolloin rakenteiden käyttö melualueilla on mahdollista ilman useita kipsilevykerroksia.

Savirappaus kasvattaa myös CLT-sisäkuorellisten ulkoseinien ilmasteneristävyyttä ja suurimmat ulkoseinien ilmasteneristysluvat saavutetaan, kun sisäverhoiluna on 30 mm savirappauksella varustettu CLT. Yläpohjien laskennalliset ilmasteneristävyydet riippuivat voimakkaasti sisäverhoilun lisäksi vesikatteesta sekä rakenteen ilmavälin suuruudesta. Suurimmat ilmasteneristävyydet saavutettiin ristikkorakenteisella yläpohjalla tiilikatteella, kun sisäverhoiluna oli 30 mm savirappauksella varustettu vanerilevy.

Lähdeluettelo

- [1] Kovalainen, V., Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2022. ECOSAFE 2 – Rakenteiden ilmasteneristävyys. Tutkimusraportti 1618693.1. Turku ja Tampere, 1.6., A-Insinöörit.
- [2] Ympäristöministeriön asetus 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä.
- [3] Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista. Suomen säädöskokoelma, nro 993/1992.
- [4] Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.
- [5] Hongisto, V., Alakoivu, R. 2022. Akustisen absorptiosuhteen määrittäminen laboratoriossa. SY21-59A. 24.1.2022. Turku, Turun ammattikorkeakoulu, akustiikkalaboratorio.
- [6] Hongisto, V., Alakoivu, R. 2022. Ilmasteneristävyyden määrittäminen laboratoriossa. SY21-59B. 24.1.2022. Turku, Turun ammattikorkeakoulu, akustiikkalaboratorio.
- [7] Riitakangas, J. 2020. Ilmasteneristävyyden parametrin laskentamallin validointi. Insinööritö. Kuopio, Savonia-ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan tutkinto-ohjelma.
- [8] Gomperts, M. C. 1964. The “sound insulation” of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*. Vol. 14, s. 1–16.
- [9] Gomperts, M. C. & Kihlman, T. 1967. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. *Acustica*, Vol. 18, s. 144-150.
- [10] Sewell, E. C. 1970. Transmission of reverberant sound through a single leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 12, s. 21-32.
- [11] Sharp, B. H. 1978. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 11, s. 53–63.
- [12] Kristensen, J. & Rindel, J. H. 1989. Byggningsakustik – teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166.
- [13] SFS-EN ISO 12354-1. 2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [14] Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmasteneristävyyden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2.
- [15] Rauhala, J., Kylliäinen, M. 2009. Eristerapatun betoniseinän ilmasteneristävyys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 142. 119 s + 83 s.
- [16] Virjonen, P., Hongisto, V. 2009. Joustavarankaisen levyrakenneseinän äänenläpäisy. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5. Akustinen Seura ry.
- [17] Kylliäinen, M. & Mikkilä, A. 2009. Rakennusosien ilmasteneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä. Rakennusfysiikka 2009. Tampere, 27.-29.10., Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 269-278.

Raitoliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointitavat

Pekka Taina ja Jarkko Punnonen
Sitowise Oy

Tiivistelmä

Tässä selvityksessä tutkittiin Suomessa yleisesti käytössä olevan, VTT:n julkaiseman kolmitasoisen runkomelun arviointimallin toimivuutta raitiotien tapauksessa. Arviointimallin laskennallinen osio perustuu Pohjois-Amerikassa suoritettuihin junaliikenteen mittauksiin ja siten mallin soveltuvuutta raitoliikenteen runkomelun arviointiin pohjoismaissa on syytä tarkastella. Selvityksessä vertailtiin turvaetäisyyksiä, laskentamallilla arvioituja runkomelutasoja sekä mitattuja runkomelutasoja Helsingin kantakaupungin alueella sijaitsevilla kohteilla. Selvityksessä arvioitiin laskentamallin tarkkuutta suhteessa mittauksiin sekä turvaetäisyyksien riittävyttä. Merkittävimpiä havaintoja olivat, että raitiotie voi aiheuttaa yleisen määräystason ylittäviä runkomelutasoja esitettyjä turvaetäisyyksiä kauempana radasta. Lisäksi havaittiin, että runkomelun laskennallisen arvioinnin ja mittaustulosten välinen ero voi olla hyvin suuri, ja joissain tapauksissa laskennallinen arviointi käyttäen suositeltua varmuusmarginaalia voi myös aliarvioida runkomelutilannetta.

1. Johdanto

Suomessa on viime vuosina ollut vireillä runsaasti raitiotiehankkeita. Ennen raitiotien rakentamista on tarpeen määritellä runkomelun vaimennustarve sekä suunnitella oikeasuhtaiset vaimennustoimenpiteet. Arvioinnin on oltava riittävän tarkkaa, jotta runkomelun vaimennustoimenpiteet voidaan hankkeissa toteuttaa kustannustehokkaasti. Runkomelun arvioinnissa on Suomessa yleisesti käytössä VTT:n vuonna 2009 julkaisema empiirinen laskentamalli [1]. Malli on helppokäyttöinen, siinä tarvittavat lähtötiedot ovat helposti saatavilla ja se on laskennallisesti hyvin kevyt. Toisaalta malliin liittyy tunnistettuja haasteita, ja julkaisussaankin sen on esitetty olevan vain suuntaa antava, mutta toistaiseksi se on ainoa kansallinen laskentamenetelmä. Myös muita laskentamalleja on esitetty kirjallisuudessa, mutta niiden käyttö ei ole yhtä laajaa. Tässä työssä tutkittiin arviointimallin tarkkuutta vertaamalla kolmen eri arviointitason (turvaetäisyydet, laskennallinen arviointi, mittaukset) tuloksia toisiinsa.

2. Runkomelun arviointi VTT mallin mukaisesti

2.1 Arviointi perustuen turvaetäisyyksiin

VTT:n julkaisun Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi [1] mukaan runkomelua voidaan arvioida kolmella eri tasolla, joista ensimmäinen on turvaetäisyyden käyttö. Tarkempi arviointi on tarpeen, mikäli tarkasteltavan kohteen etäisyys väylästä on esitettyä turvaetäisyyttä pienempi. Julkaisun mukaan esitetyn pehmeän maapohjan arvon käyttö edellyttää, että väylän tai rakennuksen alla on riittävästi värähtelyä eristävää pehmeää maata, sitä ei ole katkaistu esimerkiksi paaluilla tai kovalla tukikerroksella ja että rakennuksen sokkeli on eristetty riittävästi routasyvyyteen asti. Raitiotien osalta annetut neljä turvaetäisyyttä on esitetty taulukossa 1. Turvaetäisyydet ovat määritelty kohdan 2.2 mukaisen laskennan perusteella (raitiotie, $v = 40$ km/h).

Taulukko 1. Raitioliikenteen runkomelun turvaetäisyydet.

Liikennetyyppi	Pehmeä maa, pintaväylä, 35 dB	Kova maa, pintaväylä, 35 dB	Kallio, tunneli, 30 dB	Kallio, pintaväylä, 35 dB
Raitiovaunu 40 km/h	< 5 m	15 m	50 m	120 m

2.2 Laskennallinen arviointi

VTT:n vuonna 2009 esittämä runkomelun laskentamalli on parametrinen ja perustuu Pohjois-Amerikassa tehtyihin mittauksiin [2,3]. Menetelmä perustuu arvioituun värähtelyn nopeustasoon, mutta se ei kuitenkaan edellytä tarkkaa tietoa värähtelyn taajuuspektristä eikä spektrin muuttumisesta värähtelyn siirtymisreitillä.

Runkomelun arvioinnin lähtökohtana on peruskäyrältä saatu maaperän värähtelyn nopeustaso (L_v), jota korjataan värähtelyn aiheuttajasta, siirtotiestä ja rakennuksesta riippuvilla nopeustason korjaustekijöillä ($\Delta L_{v,i}$) siten, että lopputuloksena saadaan runkomelua kuvaava sisätilan äänitaso (L_{pA}). Esitetty peruskäyrä perustuu henkilö-, tavara- ja suurnopeusjunille annettuihin peruskäyriin [2][3]. Koska raitiovaunu on juniin verrattuna hyvin erilainen liikenneväline, on relevanttia testata menetelmän sopivuutta.

2.3 Arviointi mittauksin

VTT:n julkaisussa Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi [1] esitetään menettely olemassa olevan liikenneväylän aiheuttaman runkomelun arvioimiseksi mittauksin. Mittaukset voidaan suorittaa joko äänitasomittauksina tai värähtelymittauksina. Samassa julkaisussa esitetään myös menettely mittausten käytölle tilanteessa, jossa rataa ei vielä ole olemassa.

Mittauksissa runkomelua arvioidaan tilastollisella tunnusluvulla L_{prm} , joka määritetään A-taajuuspainotetuista ja S-aikapainotetuista enimmäisäänitasoista L_{pASmax} sekä mittaustulosten hajonnasta. Värähtelymittausten tapauksessa laskennassa käytetään A-taajuuspainotettuja ja S-aikapainotettuja värähtelyn nopeustasoja L_{vASmax} , joista voidaan laskea vastaavalla tavalla tilastollinen tunnusluku L_{vrm} . Tällöin laskennallisessa arvioinnissa esiintyvä perusarvo L_v voidaan korvata tunnusluvulla L_{vrm} , jonka jälkeen runkomelutaso L_{pA} voidaan laskea lisäämällä tarvittavat korjaustekijät kohdan 2.2 mukaisesti.

3. Tutkimusjärjestely ja -olosuhteet

3.1 Tutkimusmenetelmät

Runkomelutasojen laskennallinen arviointi suoritettiin VTT:n menettelyllä käyttäen todellisia mittauspisteiden etäisyyksiä radasta, mittauksissa arvioituja vaunujen kulkunopeuksia sekä rakennuksen tyyppiin, maapohjaan ja tarkasteltavaan kerrokseen liittyviä korjaustermejä. Väylän tai kaluston kunnan osalta ei tehty laskennallisia korjauksia. Varmuusmarginaalina käytettiin menettelyssä suositeltua arvoa 6 dB.

Mittaukset suoritettiin VTT:n julkaisussa Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi [1] esitettyjä periaatteita noudattaen. 4kpl tapauksissa mittaus suoritettiin äänitasomittauksena ja 16 kpl tapauksissa värähtelymittauksina. Värähtelymittausten tapauksessa arvioitu runkomelutaso tarkoittaa mitatuista värähtelynopeuksista L_{vASmax} arvioitua runkomelutasoa. Muunnos värähtelytasosta äänitasoksi tehtiin yleisesti käytössä olevalla menettelyllä, eli lisäämällä mitattuun värähtelyn nopeustasoon ($v_{ref} = 50 \text{ nm/s}$) 15 dB [4]. Kaikki esitetyt mitatut

runkomelutasot ovat tilastollisia tunnuslukuja L_{pm} , mikä tarkoittaa sitä, että niiden jokaisen määrittämiseen on käytetty useista raitiovaunun ohituksesta mitattuja tuloksia.

3.2 Tutkimuskohteet ja olosuhteet

3.2.1 Kohteet

Tässä tutkimuksessa runkomelua arvioitiin 10 kohteessa, yhteensä 20 kpl mittauspisteessä. Mittaukset on suoritettu vuosina 2014–2020 Helsingin kantaverkon alueella. Tutkimuskohteet sijaitsivat 9...35 metrin etäisyydellä lähimmästä raiteesta. Mittauskohteet olivat kaikki valmiita betonirunkoisia kerrostaloja. Yhdessä kohteessa rakennus oli perustettu maanvaraisesti siten, että laskennallisessa arvioinnissa voitiin käyttää rakennuksen tyyppiin liittyvää korjaustekijää. Muissa tapauksissa rakennukset oli perustettu kallion varaan. Yhteensä 9 kpl mittauspisteessä mittaus suoritettiin rakennuksen 2. kerroksesta, muissa kohteissa arviointi tehtiin ensimmäiseen maanpäälliseen kerrokseen.

3.2.2 Liikennöivä kalusto ja ratarakenne

Mittaustuloksiin sisältyi kaikkia Helsingin kantaverkolla säännöllisesti liikennöiviä kalustotyyppejä valtaosan ollessa uudempaa ForCity Smart Artic X34 kalustoa. Tutkimuksessa ei tutkittu erilaisten raitiovaunukalustojen välisiä eroja. Raitiovaunukaluston kulkunopeus vaihteli eri mittauskohteissa välillä 10...30 km/h. Mittaukset kattoivat yhteensä noin 500 vaunun ohitusta.

Helsingin kantaverkolla raitiotien rakenne voi paikoitellen hieman vaihdella, mutta perusrakenteeseen kuuluu pääsääntöisesti noin 200...300 mm paksu teräskuitubetonista valettu kiintoraidelaatta. Mitattujen kohteiden kohdalla ei ratarakenteisiin ollut toteutettu erillisiä runkomelun vaimennustoimenpiteitä ja raitiotie ei kulkenut tunnelissa tai sillalla.

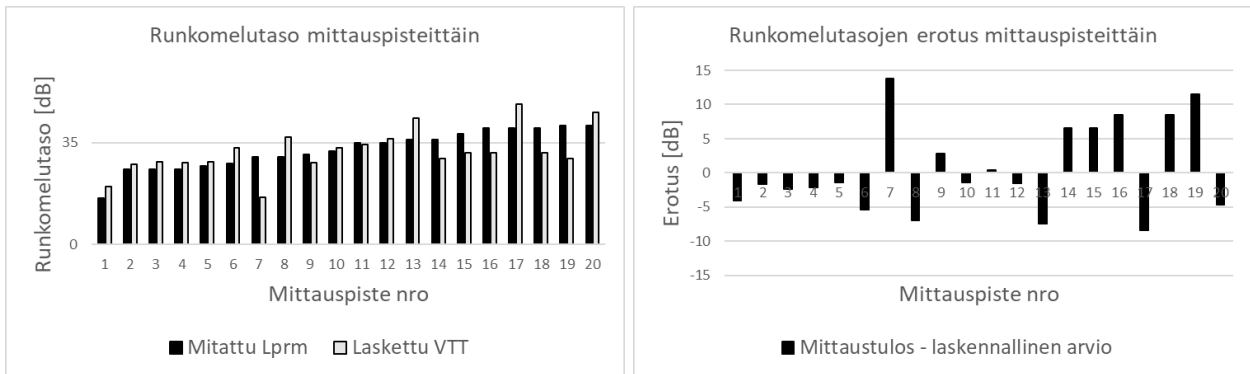
3.2.3 Maaperä

Maaperä mitattujen kohteiden välillä vaihteli. Tutkituista 20 kohteesta 2 kpl voitiin em. VTT julkaisun mukaisesti luokitella ”matalan taajuusalueen” maaperäksi eli pehmeäksi maaperäksi ja 3 kpl ”korkean taajuusalueen” maaperäksi eli kalliomaaperäksi. Muut kohteet luokiteltiin ”keskitaajuusalueen” maaperäksi eli kovaksi maaperäksi. Mittausten aikaan pääosin maaperä on ollut sula. Yhdessä tapauksessa maaperä oli jäässä mitausten aikaan, mutta tätä ei huomioitu laskennallisessa arvioinnissa.

4. Tulokset ja havainnot

4.1 Mittaus- ja laskentatulokset ja niiden väliset erot

Mitatut runkomelutasot vaihtelivat välillä 16...41 dB. Vastaaviin pisteisiin laskennallisesti arvioidut tulokset vaihtelivat välillä 16...48 dB. Mittauspisteittäin tutkittuna mittauksen ja laskennallisen arvion itseisarvon erot vaihtelivat välillä -9...+14 dB. Erotuksen itseisarvon keskiarvo oli 5,3 dB ja keskihajonta 3,6 dB. Mitatut ja laskennallisesti arvioidut runkomelutasot on esitetty kuvassa 1. Kuvasta nähdään, että mitattu runkomelutaso voi olla laskennallisesti arvioitua suurempi tai pienempi. Siten ei voida aina olettaa laskennallisen arvioinnin olevan ns. ”turvallisella puolella”, eli mitattua arvoa suurempi.

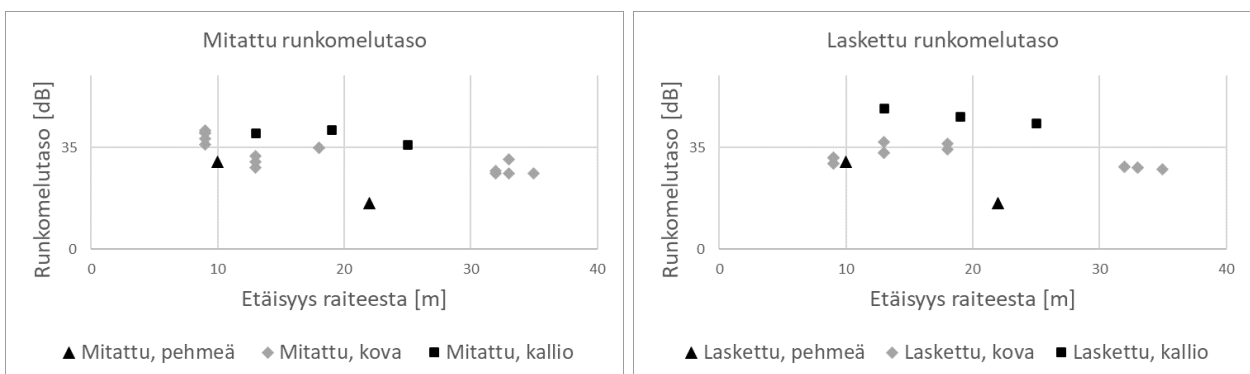


Kuva 1. Mitatut ja laskennallisesti arvioidut runkomelutasot sekä niiden erotukset mittauspisteittäin. Erotuksessa positiivinen arvo tarkoittaa sitä, että mittaustulos on laskennallista arvoa suurempi.

Erityisen kiinnostavaa on tarkastella tilanteita, jossa mitattu runkomelutaso ylittää yleisesti käytössä olevan raja-arvon 35 dB (mittauspisteet 13...20). Näissäkään tapauksissa ei kuitenkaan voida todeta laskennallisen arvon antavan aina mittaustulosta suurempia tuloksia. Toisin sanoen, vaikka laskennassa on käytetty suositeltua 6 dB varmuusmarginaalia, on joissain tilanteissa mitattu runkomelutaso silti laskennallisesti arvioitua voimakkaampaa. Eli 6 dB varmuusmarginaali ei kaikissa tilanteissa ole riittävä.

4.2 Tulokset etäisyyden suhteen

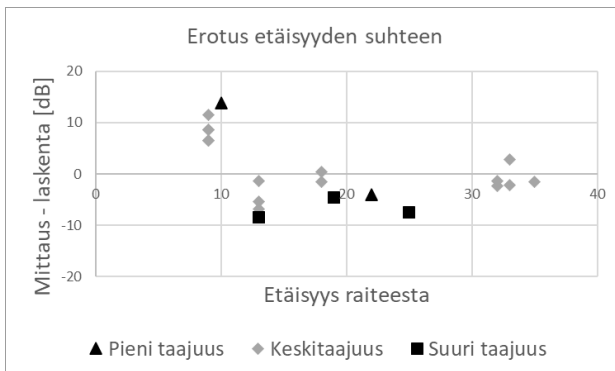
Mitatut ja laskennallisesti arvioidut runkomelutasot mittauspisteittäin etäisyyden suhteen ovat esitetty kuvassa 2. Pehmeällä maaperällä sijaitsevilla kahdessa mittauspisteessä sekä mitatut että laskennallisesti arvioidut runkomelutasot ovat suurimmillaan 30 dB. Kalliomaaperällä sijaitsevilla mittauspisteissä sekä mitatut että laskennallisesti arvioidut runkomelutasot puolestaan ylittävät 35 dB kaikissa kolmessa tapauksessa. Näiden maaperien osalta ei näin pienellä otoksella voida ottaa kantaa turvaetäisyyksien riittävyyteen.



Kuva 2. Mitatut ja laskennallisesti arvioidut runkomelutasot eri maaperillä etäisyyden suhteen.

Kovalla maaperällä 35 dB ylityksiä on mahdollista tapahtua myös kauempana radasta, kuin esitettyllä 15 metrin turvaetäisyydellä. Kun lisäksi huomioidaan, että osa mittauspisteistä ei sijainnut rakennuksen alimmassa kerroksessa, ja että mitattu raitiovaunukalusto ei täysimääräisesti edusta runkomelun tuotoltaan suurinta Helsingin alueella käytössä olevaa kalustoa, on perusteltua esittää turvaetäisyyden kasvattamista. Turvaetäisyyksien kuuluisi olla etäisyyksiä, joiden ulkopuolella tarkempi arviointi ei ole tarpeen. Turvaetäisyydessä tulisi huomioida edellä mainittujen seikkojen lisäksi myös mahdollinen maan pintakerrosten jäätyminen sekä joissain tapauksissa eri suuntiin kulkevien kohtaavien raitiovaunujen

yhteisvaikutus. Ympäristöministeriön julkaisussa Melun- ja värinätorjuntaratkaisut sekä niiden vaikutukset kaavoituksessa [5] kovalla maaperällä ja kalliolla runkomelun riskietäisyydeksi on asetettu jopa 100 m, mutta tämä kuvastanee tilannetta paremmin lähinnä kalliomaaperällä.



Kuva 3. Mitattujen ja laskennallisesti arvioitujen runkomelutasojen erotukset eri maaperillä etäisyyden suhteen. Positiivinen arvo tarkoittaa sitä, että mittaustulos on laskennallista arvoa suurempi.

Mitattujen ja laskennallisesti arvioitujen runkomelutasojen erotukset etäisyyden suhteen lähimmästä raiteesta on esitetty kuvassa 3. Tuloksia tarkastellessa nähdään, että kaikissa kolmessa tapauksessa, joissa maaperä on VTT luokituksen mukaan kalliomaaperää, laskenta yliarvioi runkomelutilannetta. Tutkimuksessa oli mukana vain 3 kpl kohteita, joissa maaperä voitiin luokitella VTT laskennassa kalliomaaperäksi. Kaikissa kolmessa tapauksessa laskennallinen tulos oli noin 4...9 dB suurempi kuin mittaustulos.

Tuloksista voidaan lisäksi nähdä, että pehmeällä ja kovalla maaperällä lähellä raidetta laskennallinen arviointi tuottaa johdonmukaisesti huomattavasti pienempiä runkomelutasoja kuin mittaus. Näissä tapauksissa siis pelkkä laskennallinen tarkastelu aliarvioi tilannetta. Oletettavasti ilmiö liittyy maan pintakerroksissa siirtyvään runkomeluhuerauteeseen, jota VTT:n esittämä malli ei tiettävästi huomioi, mutta joka on mainittu esimerkiksi Peltosen ja Backholmin esittämässä mallissa [6]. Ilmiö voi olla tässä tutkittua suurempi maaperän ollessa jäässä.

VTT arviointimallin suurimpia yksittäisiä tekijöitä on maapohjan hallitsevan taajuusalueen vaikutus. Käytettävissä oleva maaperätieto voi olla epätarkkaa tai virheellistä, mikä voi johtaa turvaetäisyyden virheelliseen tulkintaan. Maaperäluokituksen valinnan vaikutus laskennassa on 0...30 dB, ja valinta on tehtävä 15 dB askelin. Laskennassa maaperä huomioidaan yksittäisenä korjausterminä, vaikka todellisuudessa maaperän vaikutus on erilainen eri etäisyyksillä [7]. Monimutkaisemmissa laskentamalleissa maaperän ominaisuuksia voidaan huomioida tässä esitettyä laskentamallia monipuolisemmin. Tämä edellyttää maaparametrien tuntemusta sekä tietoa maan kerroksisuudesta ja paikallisesta vaihtelusta. Maaperän ominaisuuksia on mahdollista selvittää kirjallisuudesta sekä mittauksin [2,3,7,8], mutta alueellisen vaihtelun tarkempi vaikutuksen arviointi yleensä ei laajemmissa selvityshankkeissa ole realistista.

Tutkimuksessa ei selvitetty värähtelytason ja äänitason väliseen muunnokseen liittyviä tekijöitä, vaan kaikissa tapauksissa muunnoksena käytettiin arvoa 15 dB. Arvo on tyypillinen tilanteissa, joissa suunniteltavan rakennuksen ominaisuudet eivät vielä ole tiedossa. Tarkempi analyysi voitaisiin usein suorittaa kohdekohtaisesti, ja se voisi johtaa myös runkomelun arvioinnin tarkentumiseen [9,10]. Toisaalta tässä esitellyn aineiston perusteella voidaan todeta, että laskentamenettelyssä on muutenkin huomattavasti tarkentamisen varaa, ja että muunnoksen lisäksi myös muita laskentaan liittyviä tekijöitä tulisi tarkastella kriittisesti.

5. Yhteenveto

Arvioitaessa raitiotien runkomelua VTT:n laskentamallilla, voidaan havaita, että mallinnuksen tarkkuus ei ole erityisen hyvä kaikissa tapauksissa. Laskennallisen mallinnuksen ja mittaus-tulosten välinen ero tässä selvityksessä oli jopa -9...+14 dB. Laskennassa suositeltu 6dB varmuusmarginaali ei kaikissa tilanteissa ole riittävä, koska marginaalista huolimatta joissain tapauksissa mitatut runkomelutasot ylittivät laskennallisesti arvioidut.

Maaperän merkitys arvioinnissa on suuri, ja riittämättömät lähtötiedot voivat johtaa väriin arvioihin turvaetäisyyksistä ja runkomelutasoista. Kallioisilla alueilla laskentamalli näyttäisi yliarvioivan runkomelua suhteessa mittaustuloksiin. Pehmeällä ja kovalla maaperällä nimenomaan lähellä rataa mitatut runkomelutasot ovat suurempia kuin laskentamalli esittää. Oletettavasti syy tälle on, että laskentamalli ei vaikuta huomioivan maan kovissa pintakerroksissa etenevää runkomeluhäritettä.

Raitiotie voi aiheuttaa yli 35 dB runkomelutasoja rakennuksissa myös VTT:n esittämien turvaetäisyyksien ulkopuolella, vaikka turvaetäisyyksien kuuluisi olla etäisyyksiä, joiden ulkopuolella tarkempi arviointi ei ole tarpeen. Turvaetäisyyksiä on syytä tarkastaa ainakin kovan maaperän osalta. Pehmeällä maaperällä otoskoko on liian pieni vastaavan johtopäätöksen tekemistä varten. Koska pehmeän maaperän mittauksissa maaperä ei ole ollut jäässä, on mahdollista, että myös pehmeällä maaperälle esitetty turvaetäisyys ei aina olisi riittävä. Lisäksi on otettava huomioon, että kaikki mitatut raitiovaunut eivät edusta Helsingin alueella suurinta runkomelua tuottavaa kalustoa, ja osa tutkituista kohteista ei sijainnut alimmassa kerroksessa.

Lähdeluettelo

- [1] Talja, A. ja Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi: Esiselvitys. VTT Technical Research Centre of Finland. 56 s + liitt. 11 s.
- [2] FRA. 2005. High-speed ground transportation. Noise and vibration impact assessment. Washington: Federal Railroad Administration, U.S, Department of Transportation. Report HHMH No. 293630-4. 235 s.
- [3] FTA. 2006. Transit noise and vibration impact assessment. Washington DC: Federal Transit Administration. U.S, Department of Transportation, Office of Planning and Environment. Report FTA-VA-90-1003-06. 260 s.
- [4] Huhtala, T. Menetelmät tärinä- ja runkomeluhaitan arvioinnissa. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.-12.5. Akustinen seura ry.
- [5] Melun- ja tärinäntorjuntaratkaisut sekä niiden vaikutukset kaavoituksessa. Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:28. 73 s.
- [6] Peltonen, T. ja Backholm, M. Raideliikenteen runkomelun mallintaminen ja arviointi. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5. Akustinen seura ry.
- [7] ISO/TS 14837-32:2015. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground.
- [8] Vähäkuopus, V. 2022. Liikennetärinää aiheuttavan voiman karakterisointi. Diplomityö. Tampereen yliopisto, rakennustekniikan tutkinto-ohjelma.
- [9] ISO/TS 14837-31:2017. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings.
- [10] Taina, P. ja Saviluoto, T. Kelluvan lattian värähtely runkomelualueella. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.-25.8. Akustinen seura ry, s. 141-146.

Liikennetärinän torjunta rakennusten suunnittelussa

Timo Peltonen, Mats Heikkinen, Minna Santaholma, Mikko Roininen, Jukka Pätynen ja Lauri Vapalahti
Akukon Oy

Tiivistelmä

Maaliikenteen aiheuttama värähtely kytkeytyy maaperän välityksellä rakennusten perustuksiin ja rakennusrunkoihin, ja voi aiheuttaa tärinähaittaa rakennuksissa oleville ihmisille ja herkille laitteistoille. Tässä artikkelissa käsitellään rakennuksen tärinätorjunnan vaatimuksia, suunnitteluprosessia akustiikan ja rakennesuunnittelun kannalta sekä tyypillisiä torjuntakeinoja.

Tärinän voimakkuutta suunnitellussa rakennuksessa voidaan arvioida kohteessa tehtävien mittausten ja laskennallisen tarkastelun avulla. Jos arvioidut tärinäarvot ylittävät tärinälle annetut ohjearvot tai kaavavaatimuksen, tulee tärinän torjunta huomioida rakennuksen ja sen perustusten suunnittelussa. Herkkien tutkimuslaitteiden ja toimintojen tapauksessa tärinävaatimukset määräytyvät tapauskohtaisesti.

Rakennuksessa tärinän torjuntakeinot tarkoittavat tyypillisesti merkittäviä rakenteellisia erityisratkaisuja, joiden toteuttaminen tai lisääminen jälkikäteen voi olla mahdotonta. Torjuntakeinot pohjautuvat rakennusosien ominaistajuuksien mitoittamiseen; herkkien laitteiden tapauksessa käytetään lisäksi tarkoitukseen suunniteltuja vaimennustuotteita. Rakennuksen tärinätorjunta on monialasuunnittelua ja vaatii suunnittelijoiden ja hankkeen vetäjän välistä tiivistä yhteistyötä jo varhaisessa vaiheessa.

1. Johdanto

Raide- ja tieliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentaminen on välttämätöntä yhä useammassa rakennusprojektissa, jotta liikennetärinän ohjearvot eivät ylity kohteen sisätiloissa, tai jotta rakennukseen tulevien tärinäherkkien laitteiden toiminta ei häiriinny. Tiivistyvän maankäytön, täydennysrakentamisen ja uusien raideyhteyksien sekä lainsäädännön muutosten myötä tärinän torjuntaa vaativien rakennuskohteiden määrä on kasvanut viime vuosina selvästi erityisesti kaupungeissa. Tärinän torjuntaa edellyttävät kohteet ovat kuitenkin edelleen harvinaisia verrattuna kaikkien uudisrakennusten kokonaismäärään. Näin ollen on tyypillistä, että meneillään oleva kohde on rakennesuunnittelijalle, arkkitehdille, urakoitsijalle ja/tai rakennuttajalle uran ensimmäinen, jossa tärinä tulee huomioida.

Tärinä on tunto- tai tasapainoaistilla havaittavaa tai herkkien laitteistojen toimintaa haittaavaa pienitaajuisia värähtelyä (taajuusalue 1...80 Hz). Liikenteen pienitaajuinen värähtely leviää maaperässä väylän ympäristöön ja kytkeytyy rakennuksen perustusten välityksellä rakennusrunkoon. Väylän ja rakennusten alla olevat pehmeät maalajit voivat vahvistaa värähtelyä, mikäli liikenteen aiheuttama värähtelyheräte sisältää energiaa maaperän resonanssitaajuudella. Myös rakennusrunko ja välipohjat voivat edelleen vahvistaa värähtelyn amplitudia, mikäli värähtelyheräte sisältää energiaa rakennusrungon vaakasuuntaisilla resonanssitaajuuksilla (huojunta) tai välipohjien pystysuuntaisilla resonanssitaajuuksilla (lattioiden tärinä).

Tärinän torjuntaratkaisut voivat muodostaa rakennushankkeen kannalta huomattavan

kustannuksen. Tärinätorjunnan suunnittelun, toteutuksen tai mitoituksen epäonnistuminen voi toisaalta johtaa merkittäviin välillisiin ja välittömiin lisäkustannuksiin. Arvoltaan kallein kustannus on, jos rakennusta ei voida tärinän takia luovuttaa käyttötarkoituksen mukaiseen käyttöön. Tärinätorjunta kohdistetaan uudiskohteissa useimmiten rakennuksen perustuksiin ja rakennusrunkoon. Välillisesti kustannuksia voivat lisätä korjaustoimenpiteet ja vian määräytyminen, sillä perustuksiin ja rakennusrunkoon tehtävät korjaustoimenpiteet voivat olla myöhäisessä rakennusvaiheessa erittäin vaikeita.

Tähän artikkeliin on pyritty tiivistämään tärinäkohteiden rakennesuunnittelussa huomioon otettavat seikat, jotta vältetään yleisimmät ongelmat ja sudenkuopat. Lisäksi kuvaillaan suunnitteluprosessia tarvittavia työvaiheita ja yhteistyötä eri suunnittelualojen välillä.

2. Taustaa

2.1 Liikennetärinän määräykset ja ohjeavot

Rakennuksen ääniympäristöasetuksen 796/2017 [1] soveltamisohjeessa on annettu asuintilojen ohjeavot liikenteen aiheuttamalle tärinälle ja runkomelulle. Tärinää tarkastellaan käyttäen tilastollista tunnuslukua $v_{w,95}$, joka kuvaa liikenteestä aiheutuvia hetkellisiä W_m -painotetun värähtelynopeuden enimmäisarvoja. Liikenteen aiheuttaman tärinän tunnusluvun ei tulisi uusissa asuintiloissa ylittää 0,3 mm/s. Liiketiloihin, toimistoihin sekä muille käyttötarkoitukseltaan tärinäherkille tiloille on standardissa SFS 5907 [2] annettu suositussarvoja. Akustiikkasuunnittelija määrittelee tilatyypikohtaiset tavoitteet muiden kuin asuintilojen tärinälle.

Herkille laitteille tärinän tavoitearvot määritellään tapauskohtaisesti hyödyntäen mm. laitevalmistajien asettamia vaatimuksia. Herkät laitteet edellyttävät tyypillisesti noin 10...1000 kertaa pienempää tärinää kuin mikä häiritsee rakennuksessa oleskelevia ihmisiä. Usein tärinävaatimukset ilmoitetaan VC-käyrinä [3].

Tärinän huomiointi kaavoituksessa ja kaavamääräyksissä vaihtelee huomattavasti sen mukaan, koska kaava on laadittu. Uusissa kaavoissa määrätään yleensä suoraan, että liikennetärinä tulee huomioida suunnittelussa [4]. Liikenteen tärinä tulee kuitenkin huomioida myös tilanteissa, jossa niistä ei ole kaavamerkintää.

2.2 Missä tärinän torjuntaa tarvitaan?

Tärinälle tyypillisin torjuntaa vaativa kohde on radan tai raskaasti liikennöidyn väylän lähelle rakennettava asuinrakennus. Tärinän vaikutusalue vaihtelee liikennetyypin (mm. raskas tieliikenne, raitiovaunu, tavarajuna), alueen maaperän, väylän ja rakennuksen perustamistapojen, rakennuksen runkotyyppin ja kerrosluvun sekä väylän ja tärinäherkkien kohteiden välisen etäisyyden mukaan. Kallioalueilla liikennetärinä ei ole ongelma, mutta pehmeikköalueilla se voi ulottua useiden satojen metrien etäisyydelle väylästä.

Kohteeseen muodostuu tärinän torjuntatarve, mikäli sisätiloihin arvioidut tärinän tunnusluvut ylittävät niiden käyttötarkoituksen mukaisen tavoitetason. Torjuntatarve muodostuu arvioidun tärinäarvon ja kohteen tavoitearvon erotuksesta. Pienetkin tavoitearvon ylitykset edellyttävät tärinän torjunnan huomiointia rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Torjuntatarpeet ovat suurimpia tilanteissa, joissa pehmeikköalueella raskaasti liikennöidyn väylän välittömään läheisyyteen suunnitellaan asuintiloja tai herkkiä laitetoja.

2.3 Miten tärinän torjuntatarve määritellään?

Tärinän torjuntatarve ja laajuus arvioidaan akustiikkasuunnittelijan tekemässä tärinäselvityksessä. Selvitys voi pohjautua joko laskennalliseen mallinnukseen tai kohteessa tehtäviin mittauksiin [5]. Näitä menetelmiä voidaan myös yhdistää: Alustavan laskennallisen selvityksen tuottamaa torjuntatarvetta voidaan tarkentaa mittauksin siinä vaiheessa, kun rakennuskohteen massoittelu, perustustavat ja tilojen sijoittelu tarkentuvat. Mittauksissa tärinää mitataan useasta pisteestä tulevan rakennuksen alueelta. Tarkentavista mittauksista ja mallinnuksesta saadaan kattavaa tietoa tärinän torjuntasuunnittelua varten. Tarkkojen mittausten etuna voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä optimoimalla kohteeseen toteutettavien vaimennusratkaisuiden tarve ja laajuus.

2.4 Missä hankkeen vaiheessa tärinän torjuntasuunnittelu tulisi aloittaa?

Tärinän torjuntatarve tulisi huomioida jo hankesuunnitteluvaiheessa ennen kuin rakennuksen runkoratkaisuja ja tilasijoitteluja lukitaan, jotta torjuntaratkaisuille pystytään tekemään riittävät tilavaraukset ja muutosten tekeminen suunnitelmiin on vielä mahdollista. Esimerkiksi tärinätorjunnan vaatimat rakennusrungon tai perustusten muutokset voivat poiketa merkittävästi alustavista rakennesuunnitelmista. Jos tärinä huomioidaan vasta ehdotussuunnitteluvaiheen jälkeen, osaa tarvittavista muutoksista ei enää voida tehdä tai joudutaan tekemään kallista ja aikaa vievää uudelleensuunnittelua.

2.5 Miten tärinää torjutaan?

Tärinän torjuntaan on pääasiallisesti käytössä seuraavat viisi menetelmää:

- *Väylän ja sen perustamistavan parantaminen.* Tämä on tyypillisesti tehokkain ja suositeltavin torjuntatapa. Väyliin kohdistuva muutokset ja parannukset voivat kuitenkin olla haastavia toteuttaa rakennushankkeen yhteydessä. Väylän tasaisuudella on merkittävä vaikutus tärinäherätteen amplitudiin. Epäjatkuvuuskohdat kuten vaihteet, töyssyt, hidasteet sekä kaivonkannet kasvattavat tärinää huomattavasti. Paalulaatta, stabilointipilarit sekä massanvaihdot ovat tärinän vaimentamisen kannalta hyviä vaihtoehtoja. Raskaan tieliikenteen ohjaus muualle sekä nopeusrajoitukset vähentävät osaltaan tärinää.
- *Tärinän etäisyysvaimeneminen.* Tämä menetelmä tulee kysymykseen lähinnä kaavoitus- ja suunnitteluvaiheessa. Tärinä vaimenee maaperässä etäisyyden kasvaessa, vaikkakin pehmeissä maalajeissa vaimeneminen on melko hidasta. Maaperän resonanssivaikutukset voivat kuitenkin vaikuttaa tärinän kytkeytymiseen kauempanakin väylästä. Etäisyysvaimenemista voidaan hyödyntää isommissa kohteissa, jos tärinäherkät toiminnot on mahdollista sijoittaa kauemmaksi lähteestä. Tärinä ei tyypillisesti vaimene rakennuksessa ylöspäin siirryttäessä.
- *Maaperän stabilointi väylän ja rakennuksen välillä.* Tärinän etenemistä maaperässä voidaan pyrkiä vaimentamaan maanalaisella stabilointikaistalla. Kaista toteutetaan lähelle väylää tai rakennusta meluesteen tapaan. Stabilointikaista ei aina mahdu hankkeen tontin alueelle. Stabilointikaistan teho vaihtelee mm. sen leveyden ja syvyyden mukaan.
- *Rakennusosien resonanssimitoitus.* Rakennukseen kytkeytyvä tärinä voi vahvistua eri rakennusosien ominaistajuuksilla johtuen resonanssi-ilmiöstä. Maaperässä esiintyvän tärinäherätteen vahvistuminen voidaan välttää paaluperustusten, ala- ja välipohjien sekä rakennusrungon resonanssimitoituksella.

- *Tila-, laite-, ja rakennekohtaiset vaimennusratkaisut.* Mikäli tarvittavan tärinätorjunnan laajuus rajoittuu selvästi yksittäisiin tiloihin, laitteisiin tai rakenteisiin, voidaan näiden osalta tehdä paikallisia vaimennusratkaisuja. Tärinäherkät laitteet voivat vaatia esimerkiksi aktiivivaimentimia, jotta tärinäolosuhteet saadaan vaimennettua laitteiden vaatimusten mukaisiksi. Maanvaraisiin laattoihin voi olla tarve lisätä tärinää vaimentava rakennekerros, jotta lämpöeristeen ja laatan muodostama järjestelmä ei vahvista tärinää.

Tässä keskitytään rakennuksessa tehtäviin torjuntatoimiin, joihin sisältyy rakennesuunnittelua.

3. Tärinän torjunnan suunnittelu

Tärinän torjuntasuunnittelu tapahtuu akustiikka- ja rakennesuunnittelijan yhteistyönä. Hankkeen onnistunut suunnittelu vaatii rakennesuunnittelulta jonkin verran tavanomaista rakennuskohdetta suurempaa työmäärää, koska torjuntaratkaisuihin liittyy rakennesuunnittelua, jota akustiikkasuunnittelija ei voi tehdä itsenäisesti.

3.1 Torjuntaratkaisuiden periaatteet ja laajuus

Kohteen värähtelytekniinen suunnittelu käynnistyy tärinäselvityksen laatimisella. Akustikko määrittää tärinäselvityksen perusteella tärinän torjuntatarpeet, torjuntaperiaatteet ja niiden laajuuden. Torjuntasuunnittelun ensivaiheessa päätetään perusratkaisut sekä niiden sijoittelu ja laajuus kohteessa. Myös torjuntaratkaisuiden edellyttämät tilavaraukset tulee huomioida tässä vaiheessa. Kohteeseen soveltuvien torjuntaratkaisuiden tarkempi määrittely, sijoittelu, mitoitus ja detaljien suunnittelu tehdään tämän jälkeen yhteistyössä rakennesuunnittelun kanssa.

3.2 Torjuntaratkaisuiden suunnittelu

Rakennuksessa tehtävän tärinätorjunnan perusajatuksena on välttää tärinän lähteen, maaperän ja rakennusosien ominaistuuksien päällekkäisyyttä eli resonanssiketjua, joka voi vahvistaa tärinää merkittävästi. Tärinää voidaan vaimentaa katkaisemalla sen etenemisreitti mekaanisesti tai mitoittamalla rakennusosien ominaistuuksien riittävän kauas maaperässä etenevän tärinän taajuuksista.

Rakennesuunnittelija arvioi akustiikkasuunnittelijan esittämien torjuntaperiaatteiden toteutettavuutta, minkä jälkeen ratkaisuja aletaan työstää yhteistyössä. Ratkaisujen suunnittelu edellyttää sekä värähtelytekniisten että rakennetekniisten laskelmien tekemistä. Ratkaisujen vaikutusta on suositeltavaa tarkastella suunnittelun aikana myös esimerkiksi FEM-mallinnuksen avulla. Mallinnustyö ja tulosten tulkinta tehdään yhteistyössä akustiikka- ja rakennesuunnittelijan kanssa.

Torjuntaratkaisujen toteutussuunnittelussa tarvittavat lähtötiedot koostuvat pääasiallisesti tärinäselvityksessä ilmenevästä vaimennustarpeesta ja rakennesuunnitelmista. Paalujen värähtelymitoituksessa sekä tärinävaimentimien valinnassa tarvitaan lisäksi kuormatietoja, mikä voi lisätä rakennesuunnittelijan työmäärää.

Tärinän torjuntaratkaisut sisällytetään tyypillisesti rakennesuunnitelmiin. Akustiikkasuunnittelija voi tarvittaessa esittää esimerkiksi torjuntatoimien laajuuden periaatekuvia tai laitekohtaiset vaimennusratkaisut. Tärinätorjunnan suunnittelun yhteydessä esiin nousevat kysymykset koskevat usein sekä rakennesuunnittelijaa että akustikkoa. Tästä syystä rakennesuunnittelijalla tulisi olla riittävä ymmärrys ratkaisuperiaatteista, jotta ratkaisut on mahdollista toteuttaa onnistuneen torjunnan vaatimalla tavalla. Akustikko ei myöskään voi vastata ratkaisuihin

liittyviin rakenteellisiin kysymyksiin.

4. Tärinän torjunnan toteutus

Rakentamisvaiheessa on tärkeää varmistaa, että kaikki tärinän torjuntaan liittyvät ratkaisut on sisällytetty toteutussuunnitelmiin ja että työmaalla on käytössä ajantasaiset suunnitelmat. Monia tärinän torjuntaratkaisuja ei käytännössä ole mahdollista toteuttaa myöhemmin tai korjata, joten valittujen ratkaisujen suunnittelu tulee tehdä huolella. Akustikko voi tarvittaessa toimittaa työmaan käyttöön esimerkiksi paikallisten vaimennusratkaisujen asennusohjeita tai sijoittelukaavioita.

4.1 Työmaakatselmukset ja tarkastusmittaukset

Kohteeseen toteutettavista tärinän torjuntaratkaisuista riippuen voi olla tarpeen järjestää työmaakatselmuksia tai tarkastusmittauksia, joiden avulla voidaan seurata ja varmistaa ratkaisujen oikeanlainen toteutus. Akustiikkasuunnittelija ei tee työmaalla varsinaista valvontaa.

Tarkastusmittauksilla voidaan jo rakentamisen melko varhaisessa vaiheessa arvioida tärinän torjuntatoimien vaikutuksia ja onnistumista. Paikallisiin torjuntaratkaisuihin saattaa olla tässä vaiheessa vielä mahdollista tehdä muutoksia ja korjauksia, jos tärinän tavoitearvo näyttää mittaustulosten perusteella yhä ylittyvän.

4.2 Vastaanottomittaukset

Ennen kohteen luovutusta rakennusvalvonta, rakennuksen tilaaja tai tuleva käyttäjä voi vaatia tärinämittauksia, joilla todennetaan torjuntasuunnittelun onnistuminen ja tärinän tavoitearvojen täytyminen. Vaikka rakennusvalvonta ei mittauksia edellyttäisikään, niiden tekeminen on suositeltavaa onnistuneen torjunnan ja kohteen olosuhteiden laadun varmistamiseksi.

5. Tärinän torjunnan haasteet – mikä voi mennä pieleen?

Tärinän vaimennusratkaisujen toimivuus riippuu useista eri suunnittelu- ja toteutusvaiheisiin liittyvistä osatekijöistä. Oikean torjuntaratkaisun valintaan tulee valmistautua riittävän aikaisessa vaiheessa, jotta jo lukitut suunnitelmat eivät muodostu toteuttamisen esteeksi.

Tärinän torjuntaratkaisujen suunnittelu pohjautuu laskennallisiin arvioihin ja mallinnukseen, joiden tuloksiin sisältyy oletuksia ja epävarmuuksia. Etenkin herkkien laitteiden tapauksessa ja hyvin vähäistä tärinää tavoiteltaessa jo pienet poikkeamat todellisuuden ja mallinnuksen välillä voivat johtaa riittämättömään lopputulokseen. Tästä syystä ratkaisujen suunnittelussa tulee huomioida riittävät varmuusvarat ja tiedostaa mallinnukseen liittyvät riskit.

Maaperästä tehtävät mittaukset ovat tärinän arvioinnissa erittäin tärkeitä. Mikäli mittauksia ei tehdä, jäävät torjuntaratkaisujen mitoituksen lähtötiedot vajaiksi. Tulevan rakennuksen kohdalla maaperässä esiintyvän tärinän voimakkuutta tai maaperän ominaisuuksia voi olla mahdotonta määrittää riittävän tarkasti pelkillä laskennallisilla menetelmillä. Tällöin tärinän torjuntatarpeen määrittely voi epäonnistua.

6. Vastuunjako eri toimijoiden kesken

Akustikko vastaa oikeiden torjuntaperiaatteiden valinnasta ja omalta osaltaan niiden

värähtelyteknisestä mitoituksesta, jolla varmistetaan, että ratkaisulla voidaan saavuttaa kohteessa tarvittava torjuntavaikutus. Teknisen toteutuksen tarkempi suunnittelu tehdään yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa, koska tämä vaatii tiivistä rakenteellista yhteensovitusta.

Rakennesuunnittelija vastaa rakennuksen kuormitustiedoista sekä mahdollisista FEM-laskennoista, jotta rakennuksen eri osien resonanssitaajuudet saadaan arvioitua oikein. Rakennesuunnittelijan tulee viedä tarvittavat ratkaisut osaksi rakennesuunnitelmia.

Tärinävaimentimien toimittaja vastaa akustiikkasuunnittelijan ja rakennesuunnittelijan toimittamien lähtötietojen perusteella siitä, että kohteeseen hankitut vaimennustuotteet soveltuvat käyttökohteeseen ja täyttävät niille asetetut värähtelytekniset vaatimukset.

Urakoitsija vastaa torjuntatoimien toteutuksesta laadittujen suunnitelmien ja ohjeiden mukaisesti.

7. Yhteenveto

Tässä artikkelissa on käsitelty rakennuksen tärinätorjunnan suunnitteluprosessia sekä toteutuksessa huomioitavia erityispiirteitä. Torjuntasuunnittelu edellyttää tiivistä yhteistyötä hankkeen osapuolien välillä, jotta akustikon esittämät torjuntaratkaisut voidaan yhteensovittaa kohteen rakenteellisen toteutuksen sekä muiden suunnittelualojen tarpeiden kanssa. Erityisessä roolissa on akustikon ja rakennesuunnittelijan tiivis yhteistyö sekä yhteisymmärrys kohteessa tarvittavien torjuntaratkaisuiden toimintaperiaatteista ja niiden toimivuuden asettamista edellytyksistä.

Sekä torjuntasuunnittelu että ratkaisujen toimiva toteutus ovat oleellisia hankkeen onnistumisen kannalta. Asuinrakennuksissa runkomelun tavoitearvot pohjautuvat rakennuksen ääniympäristöasetukseen tai kaavavaatimukseen, ja toimistokäytössä VTT:n suositusarvoihin sekä SFS-standardiin.

Tärinäkohteen rakentamiseen liittyvät taloudelliset riskit voivat olla hyvin merkittäviä, mikäli käyttötarkoituksen edellyttämät tavoitteet jäävät saavuttamatta. Suunnitteluun ja toteutukseen liittyviä riskejä voidaan hallita tiiviillä yhteistyöllä akustikon kanssa hankkeen eri vaiheissa. Toteutusvaiheen aktiivisilla tarkastuksilla sekä mittauksilla voidaan tukea hankkeen etenemistä luotettavasti kohti onnistunutta lopputulosta.

Lähdeluettelo

- [1] Asetus 796/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä. 2017. Ympäristöministeriö.
- [2] SFS 5907:2022. 2022. Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [3] Colin G. Gordon. 1992. Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment. In SPIE 1619, Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology. <https://doi.org/10.1117/12.56826>
- [4] Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:28. 2023. Melun- ja tärinätorjuntaratkaisut sekä niiden vaikutukset kaavoituksessa. Ympäristöministeriö.
- [5] VTT Working Papers 50. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT.

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*



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 suunnitelmatarkastukseen.

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 käyty 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 epoksisauhaus 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

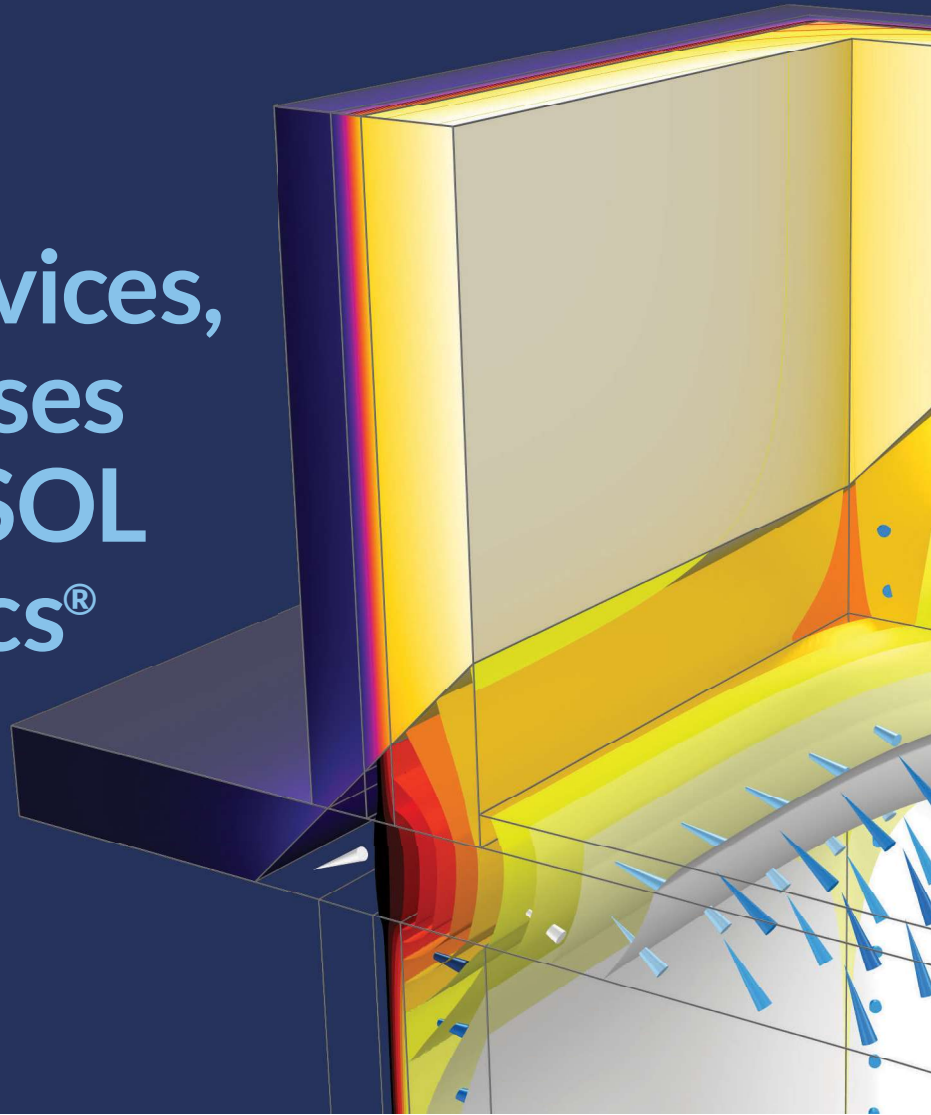



**CHRISTIAN
BERNER**

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.

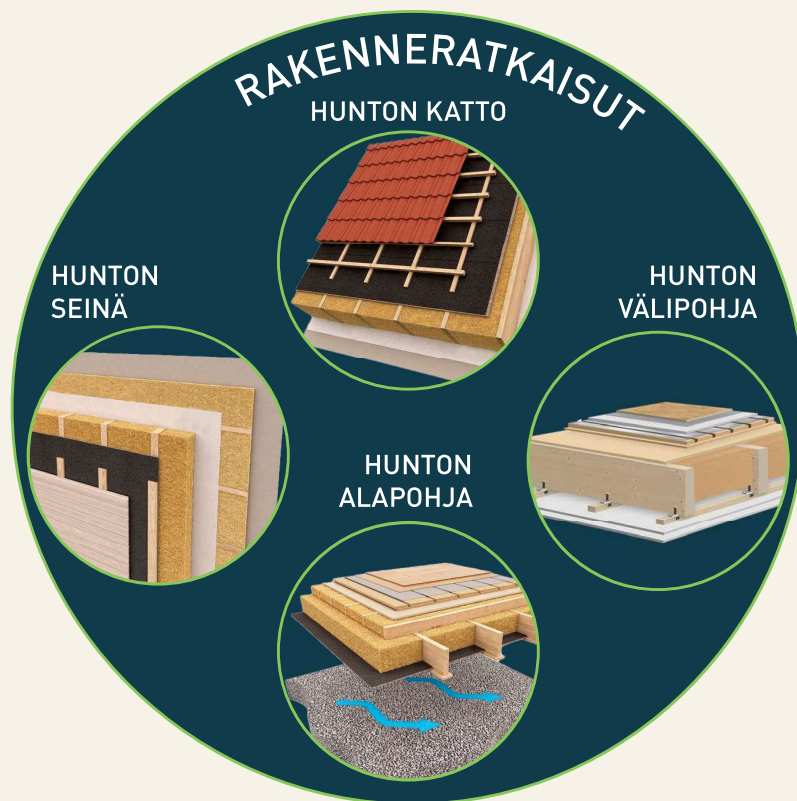
Test more design iterations before prototyping.

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.

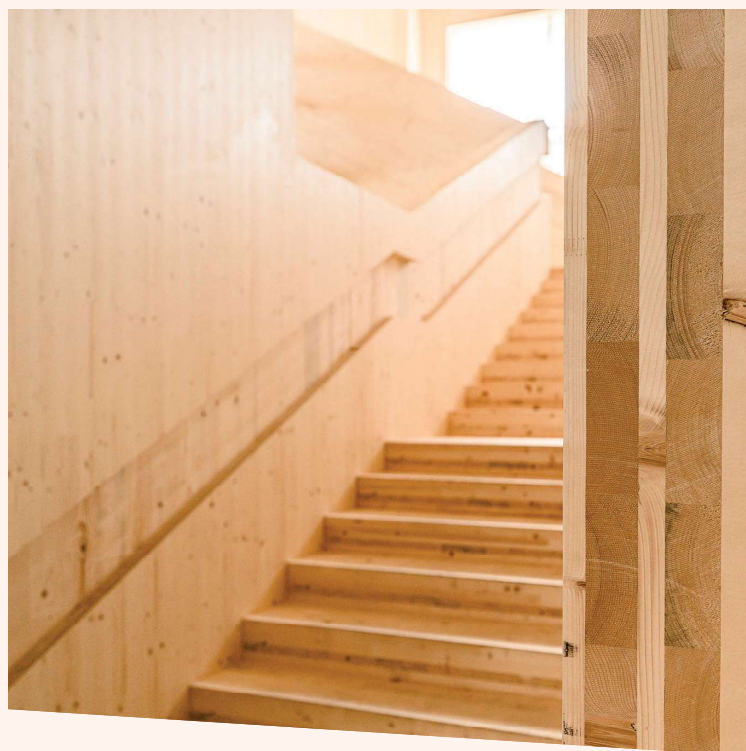
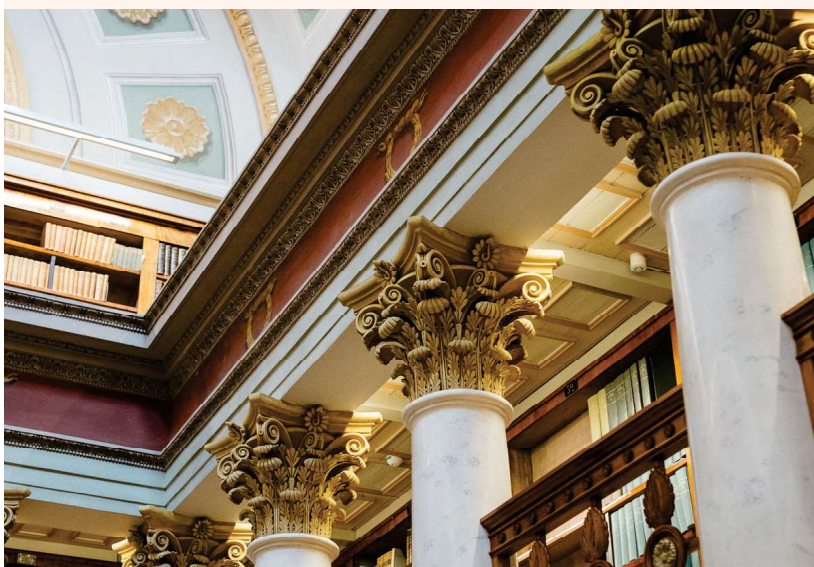


Hunton Rakeneratkaisut

- 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.

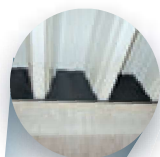
ISO-BLOCO
ONE CONTROL



ISO-CONNECT
OUTSIDE EPDM



ISO-PROFIL
FILLER STRIPS & FILLER PIECES



ISO-ZELL
THERMAL TAPE



ISO-CONNECT
HB-BAND



ISO-BLOCO 600



ISO-BLOCO ONE



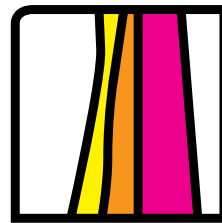
ISO-CONNECT
VARIO SD



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

TESTAA
HIILIJALANJÄLKILASKURIA
OSOITTEESSA
KATEPALGREEN.FI



GREEN

LUONNOLLISESTI PAREMPI VALINTA

VIHREÄ TULEVAISUUS RAKENNETAAN NYT!

Katepal Green vähähiilisissä bitumikatteissa hyödynnetään uusiutuvia raaka-aineita ja kierrätysmateriaaleja. Luontoa kunnioittaen.

Katepal Green -bitumikatto on hiljainen, kestävä ja helppohoitoinen.

KATEPAL

ULTRASLIM
150



Knauf UltraSlim -järjestelmä

Lisää lattiapinta-alaa ohuemmal-
la HVS-väliseinärakenteella

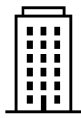
- Palonkestävyys EI90
- Ääneneristys >55 dB

**Laske lisätila
laskurilla:**

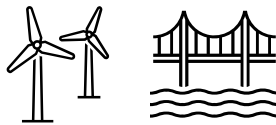


Olosuhteiden hallinta langattoman jatkuvatoimisen mittauksen avulla

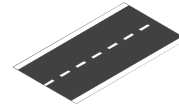
MATologin patentoidun anturitekniikan avulla rakentaminen nopeutuu ja laatu paranee, kun rakenteiden olosuhteita ohjataan hallitusti. Jatkuva reaaliaikainen mittaus rakenteista ja betonivaluista luo kokonaisvaltaisen tilannekuvan rakennustyömaan reaaliaikaisista olosuhteista, jonka avulla työmaan tilannekuva 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

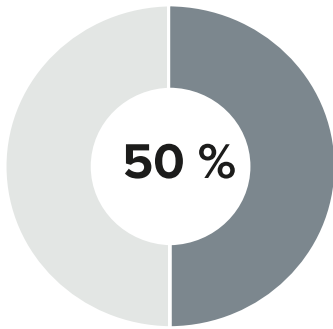
Ota yhteyttä:
info@moistmaster.fi
+358 40 5590904



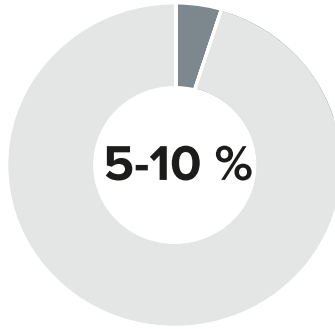
MUOTTIKOLMIO



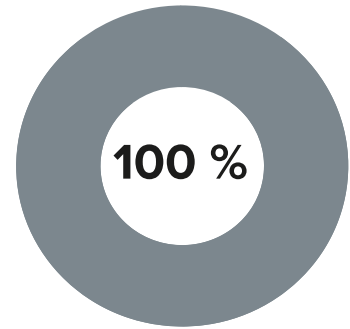
**PEIKON DELTABEAM® GREEN -LIITTOPALKKI ON
VASTUULLISEN SUUNNITTELIJAN JA RAKENTAJAN VALINTA:**



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

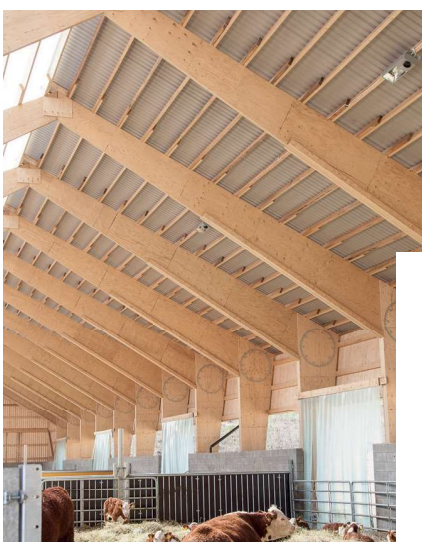


PURMO



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.

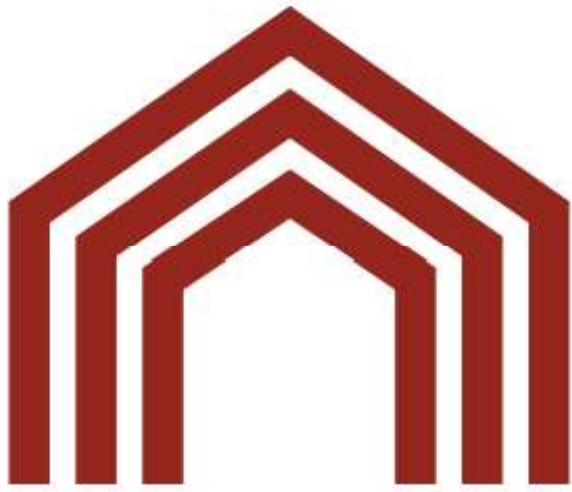
**Rakennuslehti,
siellä missä sinäkin!**

rakennuslehti.fi

sanoma

tekniikkajulkaisut





RTY

The logo consists of a purple rectangular background with a white diagonal cutout on the right side. The word "Rakli" is written in white, bold, sans-serif font within the white area.

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

RAKENNUSRESTAURINTI



RIA

Rakennusinsinöörit
ja -arkkitehdit RIA ry
www.ria.fi

ASiantuntija, 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

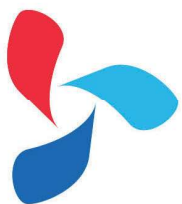
SIRATE

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



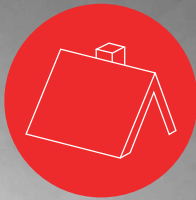
**TAMPEREEN
TILAPALVELUT**



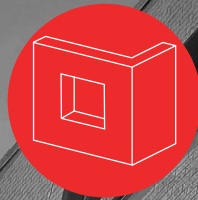


tectis

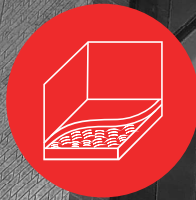
RAKENNUSKALVOT · PAPERIT · TEIPIT · NAUHAT · TARVIKKEET



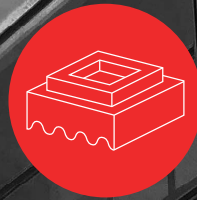
KATTO



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 kärryllä ohjelman etenemisestä!

tilatjaterveys.fi

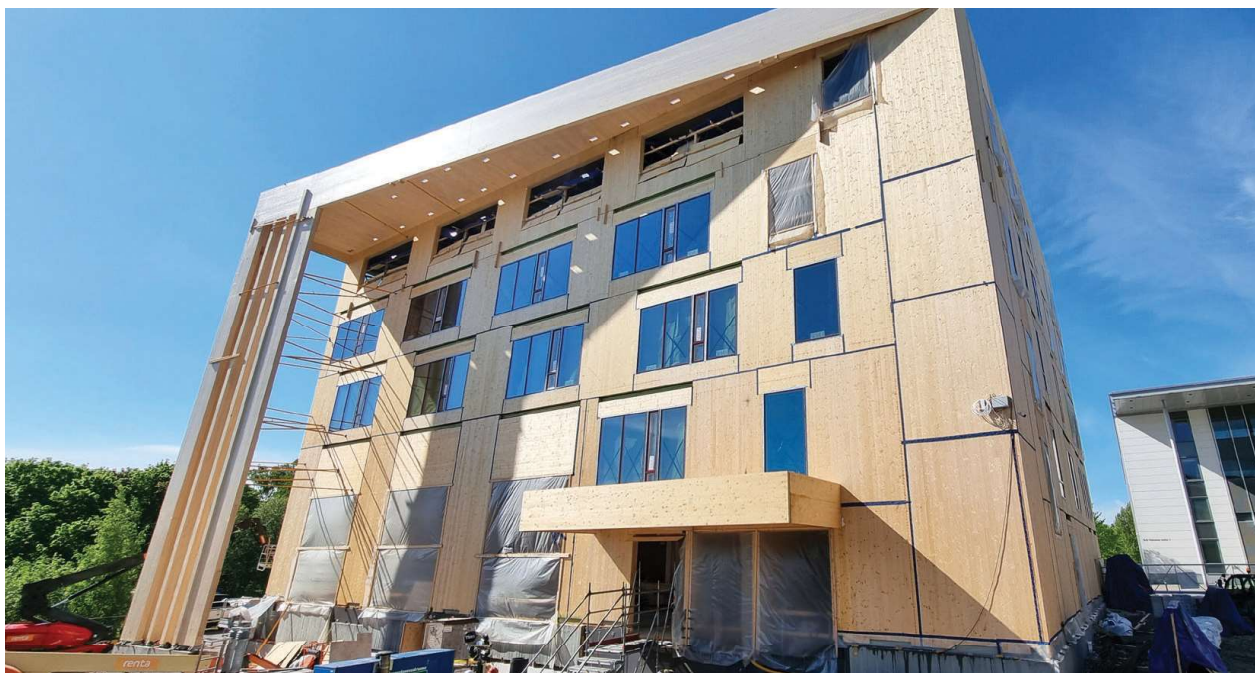
- Ohjelma
- Tilaa uutiskirje

**Seuraa meitä Twitterissä:
@TerveetTilat**

TERVEET
TILAT 2028

TIIVISTALO

TIIVISTYSJÄRJESTELMÄT RAKENTAMISEEN



**Valikoimamme täydentyy kaudelle 2024
uusilla tuoteryhmillä:**



KIINNIKKEET

Vahvat Simpson Strong-Tie -kiinnikkeet puurakentamiseen



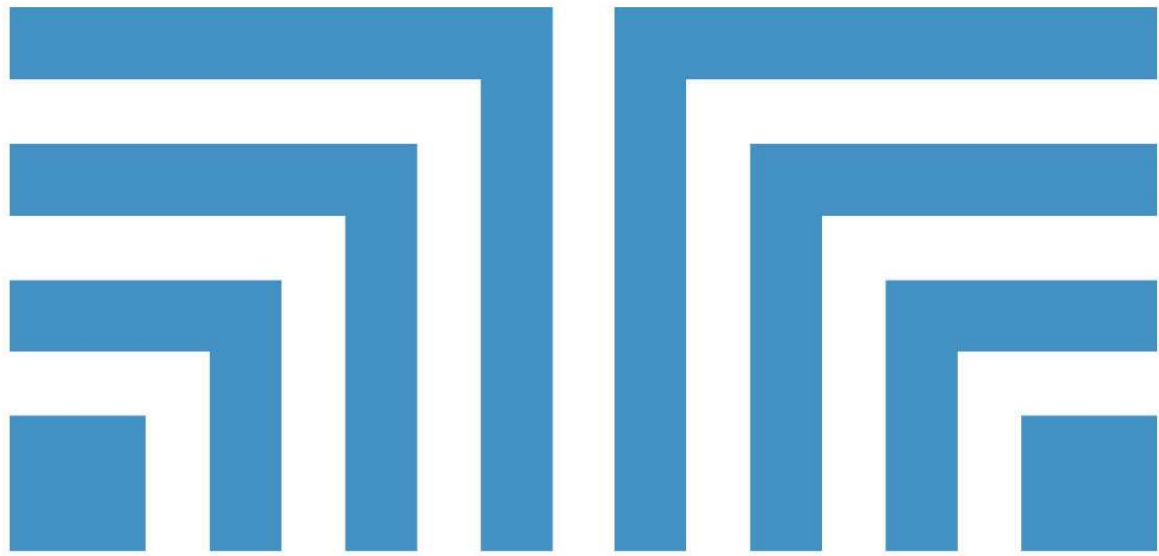
RUUVIT

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 katvealueita 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.rakennustarkastusyhdystys.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

VILPE[®] Sense



Kiinnostaako
massiivitiilirakentaminen?



Poroton U8 ja S8 P -kennoharkkot 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: kestotilaus 70 €, vuositilaus 75 €, irtonumero 12 €

Näköislehti: 70 €

Painettu lehti + näköislehti (kombo):

kestotilaus 98 €, vuositilaus 103 €

Tilaukset verkkosivujemme kautta.



Ympäristökustannus Oy
www.ymparistojenterveys.fi

