



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennusfysiikka



RAKENNUSFYSIKKA 2017

Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut
24.–26.10.2017, Tampere

Osa 2

Toimittajat Juha Vinha & Henna Kivioja

Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennustekniikka
Rakennusfysiikka
Tampere 2017

Painopaikka:
Juvenes Print
Suomen Yliopistopaino Oy
Tampere 2017

ISBN 978-952-15-4023-3

Esipuhe

TTYn rakennusfysiikan tutkimusryhmän ja RIL:n järjestämä rakennusfysiikkaseminaari pidetään nyt viidennen kerran. Tampere-talon tilat ovat uudistuneet viimekertaisen seminaarin jälkeen. Tapahtuman rinnakkaissali on vaihtunut uuteen Duetto-saliin, jossa on enemmän tilaa katsojille ja paremmat puitteet esitysten pitoon. Seminaarijulkaisu on puolestaan saatavilla nyt ensimmäistä kertaa sekä sähköisenä että painettuna kirjana.

Seminaaripäivät on jaettu jälleen eri aihepiirejä koskeviin teemoihin. Ensimmäisen päivän aiheet liittyvät rakennusfysiikan tutkimukseen, suunnitteluun ja ohjeisiin. Toisena päivänä rakennuksen kosteus- ja homeongelmat ja niiden ennaltaehkäisy sekä sisäilman laatu ovat esitelmien keskiössä. Kolmannen päivän aihepiireinä ovat pääosin energiatehokkuus ja akustiikka. Kaiken kaikkiaan seminaarissa kuullaan yli 90 puheenvuoroa.

Ympäristöministeriö uudistaa parhaillaan rakentamismääräyskokoelman osia, ja uudet asetukset niin rakennusten energiatehokkuuden kuin kosteusteknisenkin toiminnan osalta astuvat voimaan vuoden 2018 alusta. Uusista kosteusasetuksista on seminaarissa myös esitys. Muitakin rakennusfysiikkaan liittyviä uusia tai valmisteltavana olevia ohjeita esitellään seminaarissa. Näistä voidaan mainita mm. kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjausoppaan päivittytyö, joka on parhaillaan käynnissä.

Yhtenä merkittävänä osana seminaarissa on tällä kertaa TTY:n vetämän COMBI-hankkeen tulokset. COMBI-hankkeessa keskitytään palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien vaikutusten ja ongelmien selvittämiseen ja ratkaisemiseen. Hankkeessa tarkastellaan palvelurakennusten toimintaa kokonaisvaltaisesti arkkitehtuurin, rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien näkökulmista. Tästä hankkeesta seminaarissa on mukana toistakymmentä esitystä. Näistä voidaan nostaa esiin mm. tutkimukset palvelurakennuksissa mitattujen energiankulutusten eroista laskennallisiin arvoihin verrattuna sekä tavoite-energiankulutuksen pienentämisen vaikutukset elinkaarikustannuksiin, joista on saatu mielenkiintoisia tuloksia.

Kosteus- ja homevauriot ovat perinteiseen tapaan vahvasti edustettuina esityksissä. Rakennusaikaiseen kosteudenhallintaan liittyviä käytännön kokemuksia sekä uusia hyviä toimintatapoja esitellään entistä enemmän. Esityksissä on mukana myös useita case-kohteissa tehtyjä tarkasteluja. Puukerrostalorakentaminen on alkanut yleistyä myös Suomessa ja puukerrostalorakentamisen kosteusteknistä toimivuutta koskevia esityksiä onkin kuultavissa seminaarissa.

Rakennusten olosuhteiden seurantaan ja hallintaan on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota, mikä näkyy myös aiheeseen liittyvien esitelmien kasvaneena määränä. Rakennusvirheiden ja kosteusvaurioiden ennaltaehkäisemiseksi kehitetään uusia menetelmiä ja toimintatapoja. Myös rakennusten energiatehokkuuden parantaminen tavoitellulle tasolle edellyttää rakennuksen toimivuuden seuranta- ja hallintaa.

Seminaarissa kuullaan tällä kertaa kolme kansainvälistä ja yksi suomalainen keynote-puheenvuoro. Seminaari alkaa tiistaina kahden kansainvälisen rakennusfysiikan professorin puheenvuoroilla. Toisen tiistain puheenvuoroista pitää Norjan ainoan teknillisen yliopiston NTNU:n rakennusfysiikan professori Stig Geving. Hän on erikoistunut tutkimuksessaan lämmön ja kosteuden siirtymiseen rakenteissa, kosteusteknisiin simulaatioihin, kosteusvaurioihin sekä rakennusaikaiseen kosteudenhallintaan. Viime vuosina hän on keskittynyt myös rakennusten

energiatehokkuuteen. Samana aamuna ääneen pääsee TU Wienin yliopiston rakennusfysiikan professori Thomas Bednar Itävallasta. Hänen tutkimusalueitaan ovat mm. rakennusten energiankulutus, kosteustekninen toiminta ja akustiikka. Hän toimii parhaillaan mm. CIB:n rakennusfysiikkaa käsittelevän W040 ryhmän puheenjohtajana ja on aloittanut siellä uuden kehitystyön, jonka tavoitteena on tiekartta kosteusturvallisten rakennusten toteuttamiseksi. Tästäkin kuulemme lisää seminaarissa.

Keskiviikkona sosiaali- ja terveysministeriön neuvotteleva virkamies Vesa Pekkola kertoo valtionhallinnon suunnitelmista, miten 100-vuotias Suomi pyrkii selättämään rakennusten sisäilmaongelmat. Siinä on haastetta kerrakseen. Valtioneuvosto on käynnistänyt mm. Terveiden tilojen vuosikymmen –nimisen toimenpideohjelman, josta kuulemme seminaarissa. Torstain keynote-puheenvuoron pitää Arkkitehti P. Michael Pelken University of Cambridgesta Englannista. Hän kehittää rakennuksiin uusia innovaatioita ja yhdistää työssään myös arkkitehtuuria ja rakennusfysiikkaa toisiinsa. Hän pyrkii myös luomaan rakennuksia, jotka ovat kestävästä rakentamisesta periaatteilla toteutettuja.

Kosteusturvallisen rakentamisen palkinto jaetaan kolmatta kertaa. Tällä kertaa palkintoa tavoitteli lähes 40 kilpailuehdotusta, joista kuusi tuomariston mielestä ansioituneinta ehdotusta esitellään loppukilpailussa. Loppukilpailussa on esillä ehdotuksia usealta eri kosteusturvallisen rakentamisen osa-alueelta käsittäen suunnittelua, toteutusta, koulutusta, laadunhallintaa ja teknisiä ratkaisuja. Voittaja julistetaan taas perinteisesti keskiviikkoiltapäivänä ennen cocktailtilaisuutta.

Seminaarissa rikotaan jälleen useita ennätystä edellisiin seminaareihin verrattuna. Yhteistyökumppaneita on mukana peräti 74 kpl ja heistä näytteilleasettajia 45 kpl. Tämän kertaiseen seminaariin ennakoituaan tulevan myös jälleen yli 500 osallistujaa. Rakennusfysiikka siis kiinnostaa yhä enemmän rakennusalan ammattilaisia ja hyvä niin. On hienoa olla järjestämässä tapahtumaa, jolle on selvästi tarvetta ja kysyntää!

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

Tampereella 9.10.2017

Professori Juha Vinha
TTY, Rakennustekniikka
Seminaarin puheenjohtaja
RIL:n rakennusfysiikan toimikunnan puheenjohtaja

Rakennusfysiikka 2017 -seminaarin yhteistyökumppanit

Seuraavat organisaatiot ovat toimineet Rakennusfysiikka 2017 -seminaarin yhteistyökumppaneina:

ABL-laatat	Passiivikivitalot / Tulilattia Oy
Aeroc Jämerä Oy	Pesulapalvelu Hans Langh Oy
A-Insinöörit Oy	Pietiko Oy
Akukon Oy	Pyhärannan Rakennustuote Oy / PRT-pro
Amodus Oy	Rakennuslehti Oy
Arcada ammattikorkeakoulu	Rakennusteollisuuden koulutuskeskus
Betoniyhdistys ry	RATEKO
Christian Berner Oy	Rakennusinsinöörit ja -arkkitehdit RIA ry
COMSOL Oy	Rakennustieto Oy
Delete Finland Oy	RAKLI ry
Dimen Oy	Ramboll Finland Oy
FCG Finnish Consulting Group Oy	Rettig Lämpö Oy
Finnfoam Oy	SAFA
FISE	Saint-Gobain Finland Oy / Weber
Granlund Consulting Oy	Saint-Gobain Finland Oy / Gyproc
Helsingin yliopisto, koulutus- ja kehittämispalvelut	Sisäilmatutkimuspalvelut Elisa Aattela Oy
Icopal Oy	Sisäilmayhdistys ry
IdeaStructura Oy	SKOL ry
Infradex Oy	Stora Enso Oy
Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy	Suomen Sisäilmakeskus Oy
Inwido Finland Oy	Suomen Terveysilma Oy
ISO-Chemie GmbH	Suomen Yliopistokiinteistöt Oy
Jaatimet Oy	Suunnittelutoimisto Dimensio Oy
Kasil Finland Oy	Sweco Finland Oy
Katepal Oy	Tampereen kaupunki / Tampereen Tilakeskus
Kiiruna Talot Oy	Liikelaitos
Knauf Oy	Teknocalor Oy
Labroc Oy	Termater Oy
Lamox Oy / Termotuote	Thermisol Oy
Leanel Oy	Tremco illbruck Oy
Lumon Oy	Turun ammattikorkeakoulu
Läsä Lämmönsäästäjät Oy	Turun yliopisto
Metropolia ammattikorkeakoulu	Uponor Suomi Oy
Mikrobioni Oy	Vahanen Oy
Muottikolmio Oy	Vaisala Oyj
OY Abresto Ab	Vallox Oy
Parmaco Oy	Wiiste Oy
Paroc Oy Ab	Wise Group Finland Oy

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 1

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2017 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
Keynotes	1
Buildings of Tomorrow – Moisture Safe, Nearly-Zero-Energy and BIM Based Solutions Part 1: Experiences and Future Developments in Austria Part 2: CIB W040 Development of Research Road Map – Resilience and Risk Management to Mitigate Moisture Problems in Buildings <i>Thomas Bednar, TU Wien, Austria</i>	3
Innovation Strategies for the Built Environment in Research, Practice, and Teaching <i>Paul Michael Pelken and Vasilena Vassilev, P+ Studio, London, UK</i>	19
A1. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta	37
Riskianalyysi rakennusfysikaalisen toiminnan varmistamisen työkaluna <i>Anssi Knuutila</i>	39
A-Insinöörit kosteusturva: ennakoiva kosteuden- ja puhtaudenhallintapalvelu hankesuunnittelusta käyttövaiheeseen <i>Mikko Tarri, Arto Kuosku, Joonas Sihvo, Irmeli Nutikka ja Topi Mäkinen</i>	45
Muovimatolla päällystetyt betonilattiat – haasteita uudisrakentamisessa <i>Kiia Miettunen ja Leif Wirtanen</i>	51
Korkean rakentamisen haasteet asuinrakennusten kevyissä julkisivuissa <i>Andreas Linnell</i>	57
A2. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta	63
Kevytsoralla korjatun välipohjan ja täydentävällä lämmöneristeellä tehdyn kevytsorakaton kosteusteknisen toiminnan varmistaminen <i>Klaus Viljanen ja Mikko Pöysti</i>	65
Maanvastaisten seinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta <i>Anssi Laukkarinen, Roosa Heiskanen ja Juha Vinha</i>	71
Maanvaraisten alapohjarakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta ja sisäilmälähtöiset virhetulkinnat <i>Ari-Veikko Kettunen</i>	77
Maanvaraisen laatan kapselointikorjausten rakennusfysikaalinen toimivuus ja korjausten vaikutus liittyviin rakenteisiin <i>Heikki Aronen</i>	83

Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan <i>Milla Mattila, Camilla Vornanen-Winqvist, Ilkka Jerkku ja Jarek Kurnitski</i>	91
Havainnot vanhojen pientalojen rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta Remedial-tutkimushankkeessa <i>Arto Köliö, Kaisa Jalakanen ja Petri Annila</i>	97
A3. Määräykset ja ohjeet	103
Rakennuksen kosteusteknistä toimivuutta koskevan asetuksen valmistelu <i>Katja Outinen</i>	105
Valviran uusi asunnontarkastusohje <i>Pertti Metiäinen</i>	111
SULVIN ilmanvaihdon kuntotutkimusohjeistuksen merkitys sisäilmatutkimuksissa rakenneaurioisissa kohteissa <i>Lari Eskola ja Marko Björkroth</i>	117
Uusien puhdistilastandardien vaikutuksista käyttäjän kannalta <i>Pekka Friberg, Elli Laine ja Kaisa Wallenius</i>	123
Käytännön kokemuksia kosteudenhallinnan uusista ohjeista ja toimintamalleista <i>Petri Mannonen</i>	127
A4. Kosteus- ja homevauriot	133
Kosteusvaurioiden vakavuus kuntien rakennuksissa <i>Petri Annila, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha</i>	135
Ilmanvaihdon ja painesuhteiden merkitys rakenteille ja sisäilman laadulle; kolme case-tapausta <i>Saija Korpi, Lari Eskola, Terttu Rönkä, Timo Ekola, Sami Mustajoki ja Marko Björkroth</i>	141
Rakennusmateriaalin ja rakenteen vaikutus mikrobilajistoon ja -pitoisuuteen <i>Helena Rintala, Marja Hänninen, Teemu Rintala, Pinja Tegelber ja Teija Meklin</i>	147
Sisäilmaongelmaisen koulun korjausvaihtoehtojen ja purkamisen vertailu – case-tutkimus <i>Ulrika Uotila, Olli Teriö, Paavo Kero, Tero Marttila ja Malin Moisio</i>	153
A5. Rakennusaikainen kosteuden- ja olosuhteiden hallinta	159
Kuivaketju10-toimintamallin periaatteet, jatkokehitys ja kokemukset <i>Sami Saari, Pekka Seppälä, Eveliina Tackett ja Markku Hienonen</i>	161
Puukerrostalon työmaavaiheen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittaukset <i>Anssi Laukkarinen, Sami Musakka, Olavi Penttilä, Olli Teriö ja Juha Vinha</i>	167

Puukerrostalorakentamisen kosteudenhallinta <i>Olli Teriö, Olavi Penttilä, Anssi Laukkarinen, Sami Musakka ja Juha Vinha</i>	173
Julkisivujen ja parvekkeiden talvikorjausohje <i>Toni Pakkala, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö ja Petri Annila</i>	179
Olosuhteiden vaikutus rakennustyömaalla <i>Suvi Utriainen</i>	185
A6. Rakennusten olosuhteiden seuranta ja hallinta	191
Ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toiminnan seuraaminen <i>Susanna Ahola ja Jukka Lahdensivu</i>	193
Reaaliaikaiset rakennusfysikaaliset kenttämittaukset – kokemuksia Oulusta <i>Markku Hienonen, Ilkka Räinen, Mikko Mielityinen, Jukka-Pekka Savolainen ja Timo Kauppinen</i>	199
Sisäilman olosuhteiden jatkuva valvonta <i>Janne Heinonen, Virpi Leivo ja Pirkko Pihlajamaa</i>	209
Paine-erot Pirkanmaan ja Helsingin julkisissa palvelurakennuksissa <i>Antti Kauppinen, Mihkel Kiviste, Joni Pirhonen ja Juha Vinha</i>	215
A7. Kosteusturvallisen rakentamisen palkinnon voittajaehdokkaat	223
Asuinrakennusten kosteusvaurioiden korjaukset <i>Eero Nippala ja Terttu Vainio</i>	225
Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjausoppaan päivitys <i>Timo Turunen, Susanna Ahola, Jukka Lahdensivu, Inari Weijo, Esko Sistonen ja Petri Annila</i>	231
Kosteudenhallintakoulutus rakennustyömaalle <i>Tero Marttila, Jommi Suonketo, Paavo Kero ja Anne Hyvärinen</i>	237
FISEn rakennusvirhepankki kosteusongelmien ratkaisussa <i>Marita Mäkinen, Timo Turunen, Hannu Kääriäinen, Pekka Väisälä, Gunnar Åström, Helmi Kokotti ja Hannu Pekkarinen</i>	243
Rakennusten toimivuuden varmistus uudis- ja korjausrakentamisen laadunohjausmenetelmänä <i>Markku Hienonen, Ilkka Räinen, Antti Knuuti ja Timo Kauppinen</i>	249
Uusi valesokkelirakenteen korotuskorjausmenetelmä lämpöä eristävällä täyttövalulla sekä rakenteiden tiivistäminen <i>Juha Lappalainen</i>	259
A8. Energiatehokas rakentaminen 1	265
Koulujen ja päiväkotien laskettu ja toteutunut energiankulutus <i>Annu Ruusala ja Juha Vinha</i>	267

Opetusrakennusten energiatehokkuuden arviointi <i>Tiina Sekki, Miimu Airaksinen ja Arto Saari</i>	275
Energiatehokkuus on entistä enemmän sähkötehon hallintaa <i>Juhani Heljo, Jaakko Sorri ja Pirkko Harsia</i>	281
Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa <i>Juha Jokisalo, Paula Sankelo, Kai Sirén ja Juha Vinha</i>	287
Valmistautuminen lähes 0-energiarakentamiseen, Tilakeskuksen uusi rakentamistapa <i>Antti Lakka</i>	293
Suurten kiinteistöjen jäähdytysenergian tuottaminen lämpöpumpulla ja jäähdytyksessä syntyvän lauhde-energian siirtäminen kaukolämpöverkkoon <i>Antti Ahlqvist</i>	299
A9. Energiatehokas rakentaminen 2	305
Kustannusoptimaalisten peruskorjausratkaisuiden energia- ja ympäristötehokkuus 1970-luvun betonielementtirakenteisissa asuinkerrostaloissa <i>Tuomo Niemelä</i>	307
Arkkitehtuurin ja tilasuunnittelun vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen <i>Malin Moisio, Taru Lindberg, Tapio Kaasalainen ja Antti Mäkinen</i>	317
Energiatehokkuusinformaatio palvelurakennuksissa <i>Jaakko Sorri, Juhani Heljo, Ulrika Uotila ja Annu Ruusala</i>	325
Energiakortti rakennushankkeen tavoitteiden asettamisessa ja todentamisessa <i>Olli Teriö, Juhani Heljo, Sakari Uusitalo ja Pirkko Pihlajamaa</i>	331
Suuren lämmöneristämättömän maanvastaisen alapohjan vaikutus rakennuksen energiankulutukseen <i>Petteri Huttunen, Juha Rantala ja Juha Vinha</i>	335
U-arvojen mittaukset nopeasti ja tarkasti – periaatteet ja mahdollisuudet <i>Mikael Paronen</i>	343
A10. Toimivat ja kestävät rakennukset	349
Toimivuustarkastusten merkitys rakennuksen elinkaarelle <i>Pirkko Pihlajamaa, Sakari Uusitalo ja Olli Teriö</i>	351
Rakennuksen kokonaisvaltainen laadunhallinta <i>Miika Virtanen</i>	357
Rakennusfysikaalisten riskien huomioiminen kiinteistön ylläpidossa ja riskeihin liittyvän tiedon hallinta – kiinteistönomistajan toimintamalli <i>Johanna Jalas, Timo Turunen, Markku Uusitalo ja Jarmo Perkiö</i>	363
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	369

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 2

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2017 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
B1. Kosteudenhallinnan tekniset ratkaisut	371
Uuden betonilattian kuivattaminen Tulilattian Fööni-kuivatusputkistolla <i>Ville Ahvenainen, Pasi Lehtimäki ja Esa Tommola</i>	373
FF-WALL -seinäjärjestelmä <i>Jouni Eronen ja Asso Erävuoma</i>	379
Rakentamisen kuivaketjun varmistaminen teollisuusrakentamisessa – teräslevypintaiset sandwich-seinäelementit <i>Pasi Turpeenniemi ja Erkki Honkakoski</i>	385
Temperierung-menetelmä ja sen soveltaminen massiivirakenteisten seinien kosteusteknisissä korjauksissa <i>Jani Sorasalmi</i>	391
B2. Rakennusfysiikan laskentamenetelmät ja mittauslaitteet	397
Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla <i>Pauli Sekki, Lauri Korhonen ja Juha Vinha</i>	399
Betonilaatan ja sen kuivatusputkiston toiminnan numeerinen simulointi <i>Timo Karvinen ja Pauli Sekki</i>	407
Alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliset FEM-simuloinnit <i>Juha Salo, Petteri Huttunen ja Juha Vinha</i>	413
The application and the potential of QUB/e in the Nordic countries: new perspectives for fast in-situ measurements of the building thermal performance <i>Andrea Mazzucco and Jussi Jokinen</i>	423
Mittauslaitteistojen soveltuvuus alipaineistettujen osastojen paine-eron pysyvyyden seurantaan asbestipurkutöissä <i>Timo Jalonen</i>	431
Uusi menetelmä rakennusten vuotoilmavirtojen määrittämiseksi <i>Ilpo Kulmala ja Pertti Pasanen</i>	437
B3. Materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet	441
Lämpötilan vaikutus eristemateriaalien lämmönjohtavuuteen <i>Hanna Kianta</i>	443
Rakennuseristemateriaalien kosteuskäyttäytyminen ja hyvät rakennustavat <i>Hannu-Petteri Mattila</i>	449

Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet	455
<i>Eero Tuominen, Maarit Vainio ja Juha Vinha</i>	
Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen	461
<i>Kari Vääntinen, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	
Viilupuun (LVL) kosteustekniset ominaisuudet ja käyttö rakennuksessa	471
<i>Niko Laakso</i>	
B4. Sisäilman haitta-aineet	477
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyyppisen uudisrakennuksen sisäilmassa sekä uusien kalusteiden vaikutus sisäilman VOC-tuloksiin	479
<i>Pirita Suortamo ja Sanna Lappi</i>	
Korjattujen ja korjaamattomien lattiarakenteiden pitkäaikaisseurannan oirekyselyjen tuloksia	487
<i>Pertti Metiäinen ja Helena Mussalo-Rauhamaa</i>	
Onko sisäilmaongelmat ymmärretty oikein?	493
<i>Janne Liimatainen ja Gunnar Laurén</i>	
B5. Sisäilman laatu	499
Rakennusten peruskorjauksessa tai laajennuksessa usein liian vähälle huomiolle jääneitä sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä	501
<i>Timo Hautalampi</i>	
Arviointimenetelmä korjaussuunnitteluratkaisujen vaikutuksesta rakennuksen altistumisolosuhteisiin	507
<i>Veli-Matti Pietarinen, Kai Nordberg, Juha Heikkinen, Liisa Kujanpää ja Helmi Kokotti</i>	
Käyttöä turvaavat toimenpiteet kosteus- ja homevaurioituneissa rakennuksissa	517
<i>Kaisa Jalkanen, Hanna Leppänen, Mari Turunen ja Ulla Haverinen-Shaughnessy, Tero Marttila ja Anne Hyvärinen</i>	
Kohti sisäilmasairaalle soveltuvaa rakentamista – kehitystyön lähtökohtia	523
<i>Katja Pulkkinen</i>	
Elinkaarikoulujen pintapölyt ja siivottavuus	529
<i>Leila Kakko</i>	
B6. Sisäilmatutkimukset	533
Uusi sisäilman laadun tutkimusmenetelmä	535
<i>Elisa Aattela</i>	
Uusi menetelmä sisäilmaongelmaisten rakennusten priorisointiin	541
<i>Julia Debbarh</i>	

Työpaikkatilojen jatkuvatoiminen radonmittaus <i>Pasi Arvela</i>	547
B7. Ääneneristys ja meluntorjunta	551
Ilmääneneristävyyden mittauksia koskeva round robin -testi <i>Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen</i>	553
Tampere-talon laajennuksen ja tilamuutosten akustiikkasuunnittelu <i>Jussi Rauhala, Mikko Kylliäinen, Jesse Lietzén, Joose Takala, Ilkka Valovirta ja Mikael Ruuhonen</i>	559
Betonirakenteisten alalaattavälipohjien ääneneristävyyden korjaaminen nykytasoon kevytrakennetekniikalla <i>Arto Hyttinen</i>	565
Julkisivurakenteiden ääneneristävyys pientaajuuksilla <i>Valtteri Hongisto, Jukka Keränen ja Jarkko Hakala</i>	571
Kalkkisementtistabiloinnin teknistaloudellinen soveltuvuus liikennetärinä vaimennukseen <i>Timo Huhtala, Mikael Ruuhonen ja Mikko Kylliäinen</i>	577
Länsimetron runkomelu ja eristysratkaisut <i>Henri Penttinen, Timo Peltonen ja Timo Markula</i>	583
B8. Huoneakustiikka	589
Avointen oppimisympäristöjen edellyttämät ääniolosuhteet <i>Mikko Kylliäinen ja Rauno Pääkkönen</i>	591
Osallistava melunhallinta ja akustointi – Miten opetustilan ääniympäristöä voidaan parantaa? <i>Jaana Jokitulppo, Sirpa Pirilä, Elina Niemitalo-Haapola ja Leena Rantala</i>	597
Kalusteet osana tilan akustista ratkaisua <i>Rauno Pääkkönen ja Mikko Kylliäinen</i>	603
Ääniolosuhteiden kustannusvaikutukset avotoimistoissa <i>Joni Kemppainen, Henry Niemi, Mikko Kylliäinen ja Antti Mikkilä</i>	609
Hoitohenkilökunnan kokemus sisäympäristöstä Tampereen yliopistosairaalassa <i>Valtteri Hongisto Riikka Helenius ja Isto Nordback</i>	615
Suomalaisten sairaalatiloiden huoneakustiikka; mittauksia ja huomioita <i>Jyrki Kilpikari ja Kalle Lehtonen</i>	621
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	625

B1. Kosteudenhallinnan tekniset ratkaisut

Uuden betonilattian kuivattaminen Tulilattian Fööni-kuivatusputkistolla

Ville Ahvenainen, Pasi Lehtimäki ja Esa Tommola
Tulilattia Oy

Tiivistelmä

Tämä tutkimus tehtiin Tulilattian ilmakiertoisen Fööni-kuivatusjärjestelmän toimivuuden kokeilemiseksi. Järjestelmä perustuu putkissa virtaavan ilman kykyyn kuljettaa kosteutta betonirakenteen sisältä pois. Tutkimusta varten valettiin koelaatta, jonka lämpötilan ja kosteuden kehitystä ja poistumista seurattiin antureilla useassa eri mittauspisteessä. Tutkimuslaatan rinnalle valettiin vertailulaatta, josta saatiin ainoastaan pinnoiltaan kuivuvan laatan kuivumisnopeus. Tutkimuksessa todistettiin järjestelmän toimivuus – tutkimuslaatta kuivui selvästi vertailulaattaa nopeammin. Muita betonilaatan kuivumista nopeuttavia tekijöitä tutkimustulosten mukaan olivat sähkövastuksen käyttö, putkijaon tihennys ja puhallettavan ilman lämmitys ja kuivaus, päällystämisen hidastaessa laatan kuivumista.

Tulilattian Fööni-kuivatusputkiston kuivattavaa ominaisuutta on käytetty jo erilaisissa käytännön sovellutuksissa, kuten rakenteiden kuivattamiseen ja kuivana pitoon esimerkiksi kosteusrasituksellisissa maanvastaisissa alapohjarakenteissa, sekä rakenteiden kuivumisen nopeuttamiseen uudiskohteissa. Lisäksi mittausjärjestelmillä voidaan toteuttaa jatkuva kosteuden valvonta.

1. Johdanto

Betonilattioiden kosteusvaurioiden aiheuttamia vuotovahinkoja korvattiin vuonna 2012 36 000 kappaletta [1]. Paikallavaletun betonilaatan kuivumisaika on usein myös uudisrakennuskohteissa työmaan etenemistä rytmittävä tekijä. Toisin sanoen, mitä nopeammin betonilaatan saa rakennusvaiheessa kuivatettua, sitä nopeammin rakennuskohde on mahdollista saada valmiiksi. Uudiskohteissa laatan liian nopea pinnoittaminen voi johtaa käytönaikaisiin home- ja sisäilmaongelmiin, kun pinnoitteen alle jäävässä kosteassa betonissa syntyy homekasvusto. Aikataulu- ja kustannussyyt saattavat johtaa hätiköintiin ja liian aikaiseen laatan pinnoittamiseen. Rakennusvirheiden korjaaminen jälkikäteen aiheuttaa lisäkustannuksia ja aikataulun venymistä. Lisäksi ne heikentävät asiakastyytyväisyyttä sekä yrityksen ja rakennusalan imagoa. Kehittyneemmällä kuivatusmenetelmällä rakennusaikaa on mahdollista lyhentää ja kuivattaa myös käytön aikana kastuneita rakenteita.

Tätä artikkelia varten tutkittiin Tulilattian Fööni-kuivatus ilmakiertoisen putkiston ja siihen yhdistettävän sähkövastuksen vaikutusta betonilaatan kuivumisnopeuteen ja -aikaan. Tampereen Atalaan tehtiin koervalu, josta mitattiin betonin kosteuspitoisuus eri mittauspisteistä eri ajankohtina. Tutkittavia asioita olivat putkien k-jaon, sähkövastuksen, mittaussyvyyden ja päällystämisen vaikutus kuivumisnopeuteen. Tuloksia verrattiin samassa tilassa olevaan verrokkilaattaan, jonka annettiin kuivua vapaasti ilman ulkopuolista lämmitystä tai kuivatusta. Tavoitteena oli tutkia järjestelmän eri muuttujien vaikutusta yhdessä ja erikseen laatan kuivumisnopeuteen ja kosteuden poistumisnopeuteen putkiston kautta. Työn merkittävimmät

saavutukset ovat järjestelmän toimivuuden osoittaminen ja kuivumisnopeuden määrittäminen muuttujien eri yhdistelmillä.

2. Taustateoria

2.1 Betonin kosteuslähteet

Betonin kosteuslähteitä ovat esimerkiksi rakentamisaikainen kosteus, huonon salaojituksen tai padotuksen takia rakennukseen päässyt ulkopuolinen kosteus, käytönaikainen kosteus (esimerkiksi suihku, saunominen, tiskaus, pyykkäys) ja vesivahingot. Paikallavalettujen betonirakenteiden merkittävin kosteuslähde on rakentamisaikainen kosteus, toisin sanoen veden ja sementin väliseen hydrataatioreaktioon osallistumaton vesi [2].

2.2 Kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Betonilaatan kuivumisnopeuteen vaikuttavat esimerkiksi ympäröivän ilman lämpötila ja kosteus, betonin lämmitys, pinnan hionta, työnaikainen suojaus, jälkihoitomenetelmät, käytetty betonimassa, laatan paksuus ja laatan alusrakenne. Betonilaatta kuivuu nopeammin lämpimässä ja kuivassa ilmassa [3]. Betonilaatan lämmitys ja pinnan hionta nopeuttavat kuivumista [4]. Laatan paksuuden kasvatus pidentää kuivumisaikaa eksponentiaalisesti [5].

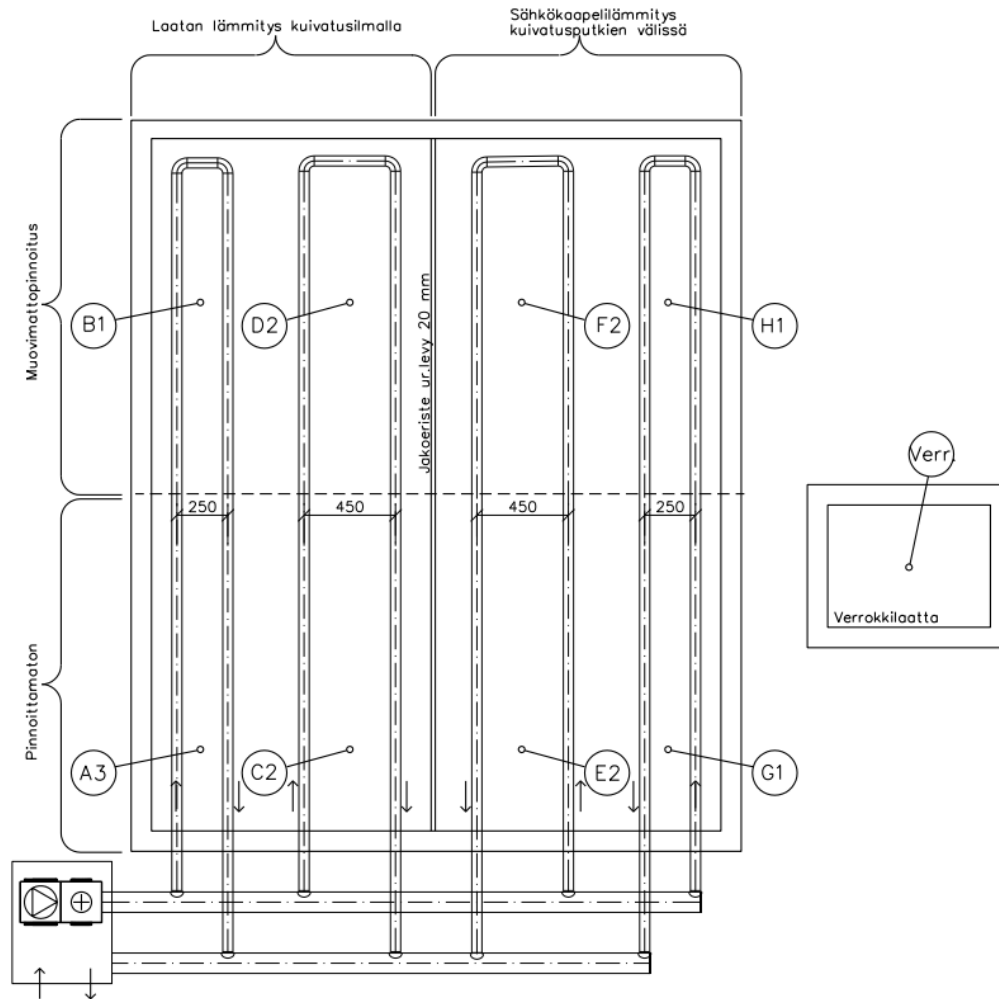
2.3 Tulilattian Fööni-kuivatusjärjestelmän toimintaperiaate

Tulilattian Fööni-kuivatusjärjestelmän kuivattava vaikutus perustuu betonilaatan sisällä kiertävään ilmakiertoiseen lämmitysputkistoon. Putket on rei'itetty, jolloin kosteuden on mahdollista siirtyä laatasta putkissa kiertävään lämmitysilmaan. Putket on kääritty ilmanläpäisevään kankaaseen, jotta betoni ei pääse valuvaiheessa tunkeutumaan putken sisään. Lämmönlähteenä voi toimia lähes mikä tahansa lämmitysmuoto, kuten lämpöpumppu, suora sähkö, kaukolämpö tai takka. Järjestelmä nopeuttaa laatan kuivumista pinnoituskuivuuteen työmaa-aikana ja mahdollistaa kosteusvaurion kuivattamisen käytön aikana putkiston kautta. [6]

3. Betonilaatan kuivumiskokeet

3.1 Koejärjestely

Tampereen Atalaan valettiin koelaatta, johon asennettiin ennen valua Tulilattian Fööni-kuivatusputkisto (kuva 1). Laatan ja putkissa kulkevan ilman kosteuden seuranta aloitettiin laatan ollessa 10 päivän ikäinen. Seurannan päättyessä laatta oli 146 päivän ikäinen. Koelaatan toiseen puoliskoon asennettiin lisäksi 3 kW:n lattialämmityskaapeli kulkemaan putkijaon puolivälissä. Kaapelilla lämmitettyä puolta kutsutaan sähkövastuspuoleksi ja toista puolta Tulilattia-puoleksi. Molemmissa puolissa oli yksi väli k250-jaolla ja yksi väli k450-jaolla. Puolet koelaatan pinta-alasta päälystettiin 56 päivän iässä 0,03 mm muovilla ja 88 päivän iässä paksulla muovimatolla. Koelaatan viereen valettiin samoihin olosuhteisiin samasta betonimassasta vertailulaatta, joka kuivui vain pinnoiltaan. Valettavat laatat olivat 120 mm paksuja.



Kuva 1. Koejärjestely.

Laattaa asennettuun suljettuun lämmityspiiriin kytkettiin puhallin, VEAB-kanavalämmitin ja CTR 500XT -adsorptiokuivain. Kanavalämmitin lämmitti vain Tulilattia-puolelle menevää ilmaa.

Tutkittavat kuivumiseen vaikuttavat muuttujat koelaatassa olivat sähkövastuksen käyttö, Tulilattia-putkien k-jako ja päällystys. Koelaatassa oli kahdeksan mittaussektoria, jolloin muuttujien kaikki mahdolliset yhdistelmät saatiin tutkittua. Mittauspisteet sijoitettiin k-jaon keskikohdan lisäksi 50 mm:n päähän kuivatusputkista. Keskellä putkia mittaus suoritettiin 25, 48 ja 100 mm:n syvyydeltä.

4. Tutkimustulokset ja johtopäätökset

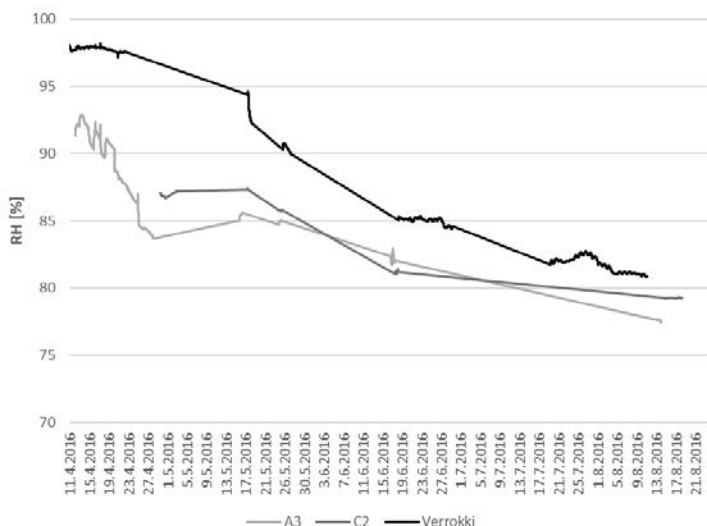
4.1 Kriittiset kosteuspuitoisuudet

Vertailuun valittiin varsinaisen koelaatan jokaisesta sektorista k-jaon puolivälissä oleva 48 mm:n syvyydessä oleva mittauspiste (taulukko 1). Osa mittauspisteistä kuivui 90 % RH:n rajaa kuivemmaksi jo ennen kuin mittausta ehdittiin aloittaa kyseisestä pisteestä. Osa taas ei ehtinyt mittaajakson aikana kuivumaan 80 % RH:n alapuolelle. 85 % RH:n kosteuteen kuivumiseen kulunut aika saatiin mitattua kaikista pisteistä.

Taulukko 1. Mittauspisteiden kuivuminen eri kosteusarvoihin.

Nimi	k-jako	Sähkövastus	Päällystys (56/88 d)	90 % RH (d)	85 % RH (d)	80 % RH (d)
A3	250	Ei	Ei	21	51	95
B1	250	Ei	Kyllä	32	52	>146
C2	450	Ei	Ei	<27	56	106
D2	450	Ei	Kyllä	52	81	>146
E2	450	Kyllä	Ei	<32	40	97
F2	450	Kyllä	Kyllä	31	70	>146
G1	250	Kyllä	Ei	<33	36	40
H1	250	Kyllä	Kyllä	<32	37	78
Verrokki	-	Ei	Ei	57	86	>146

Betonilaatan kuivumista nopeuttivat selkeästi putkien tiheämpi k-jako ja sähkövastuksen käyttö. Sähkövastuspuolella mittauspisteet kuivuivat 85 % RH:in noin kaksi viikkoa Tulilattia-puolta aiemmin. Putkien k-jaon merkitys oli suurempi päällystetyllä puolella. Päällystämättömällä puolella k250-alue kuivui 85 % RH:in 4–5 päivää ennen k450-aluetta, kun päällystetyllä puolella ero oli 29–33 päivää.



Kuva 2. Kosteuskuvaajat päällystämättömällä Tulilattia-puolella k250- ja k450-alueella.

Päällystys hidasti selkeästi laatan kuivumista, muttei pysäyttänyt sitä kokonaan. Vertailulaatta kuivui kaikkia päällystämättömiä mittauspisteitä hitaammin, mistä voi päätellä laatasta poistuvan kuivatusputkien avustuksella kosteutta nopeammin kuin pelkästään pintojen kautta.

4.2 Laatan kosteusjakauma sivu- ja pystysuunnassa

Laatan suhteellinen kosteus oli päällystämättömällä puolella lähellä betonin pintaa 25 mm:n syvyydessä pienempi kuin syvemällä 48 ja 100 mm:n syvyydessä. Päällystetyllä puolella kosteus jakaantui pystysuunnassa tasaisemmin päällystysten jälkeen, kun vesi ei päässyt enää haihtumaan yläpinnan kautta.

Sivusuunnassa kuivatusputkien lähellä olevissa mittauspisteissä laatta oli odotetusti putkien keskikohtaa kuivempi. Kuivatusputket kuivattivat lähiympäristöään muuta laattaa nopeammin.

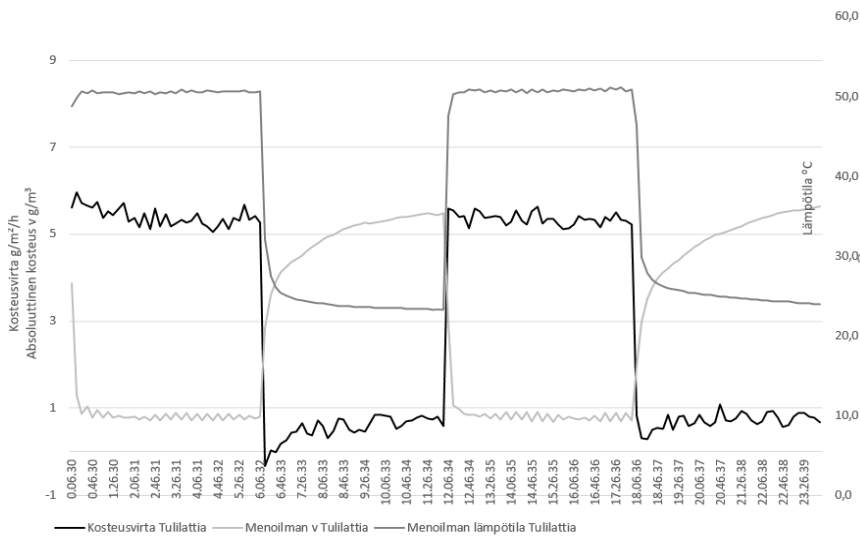
4.3 Putkiston mittaustulokset

Kanavalämmittintä ja adsorptiokuivainta pidettiin seurantajaksolla osa ajasta jatkuvasti päällä ja osa ajasta ajastimen takana päällä ja pois kuuden tunnin sykleissä. Meno- ja tuloilman kosteudesta ja lämpötilasta pystyttiin laskemaan laatasta putkien kautta poistuva kosteusvirta. Kosteusvirran arvot eri yhdistelmillä on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Kosteusvirran arvot kanavalämmittimen ja adsorptiokuivaimen syklistyden erilaisilla yhdistelmillä.

Kanavalämmitin	Kuivain	Puoli	Kosteusvirta (g/m ² /h)
Päällä	Päällä	Tulilattia	8–11
Syklinen 6 h	Päällä	Tulilattia	6–7
Syklinen 6 h	Syklinen 6 h	Tulilattia	3–4
Pois	Päällä	Sähkövastus	15–25
Pois	Syklinen 6 h	Sähkövastus	5–10

Kosteusvirta oli suurimmillaan sähkövastuspuolella kuivaimen ollessa jatkuvasti päällä. Kosteusvirran kuvaaja Tulilattia-puolella syklisen lämmityksen ja kuivauksen ajalta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kosteusvirran muutokset Tulilattia-puolella vuorokauden ajalta kanavalämmittimen ja adsorptiokuivaimen ollessa syklisty päällä.

Myös Tulilattia-puolella kuivuminen oli nopeinta jatkuvalla kuivauksella ja lämmityksellä.

5. Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin betonilaatan kuivumisnopeutta Tulilattian Fööni-kuivatusjärjestelmän avustuksella. Vertailukohtana toimi samassa tilassa ollut verrokkilaatta, jossa ei käytetty mitään ulkoista kuivatusmenetelmää. Varsinaisessa tutkimuslaatassa tutkittiin putkien k-jaon, sähkövastuksen, päällystyksen, adsorptiokuivaimen ja puhallusilman kanavalämmityksen vaikutusta laatan kuivumiseen.

Tulilattian Fööni-kuivatusjärjestelmä osoitti kykynsä nopeuttaa betonin kuivumista – tutkimuslaatan tärkeimmistä mittauspisteistä suuri osa kuivui kriittisiin kosteuspitoisuuksiin yli kuukautta ennen verrokkilaattaa. Johtopäätöstä tukee myös kuivatusputken ilmavirrasta laskettu kosteusvirran arvo, joka oli suurimman osan mittaussjaksosta yli $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Tiheämpi putkien k-jako lyhensi laatan kuivumisaikaa.

Sähkövastuksen käyttö Tulilattian Fööni-kuivatuksen tukena kasvatti selvästi laatan kuivumisnopeutta. Teho näkyi sekä betonista mitattujen pisteiden nopeampana kuivumisena, että ilmavirrasta saatujen mittaustulosten avulla lasketun kosteusvirran suurempana arvona. Sähkövastuksen betoniin tuottama lämpöenergia on ilmeisen tehokas siirtämään kosteutta sivusuunnassa kohti kuivatusputkia, jolloin haihtuminen putkien rajapinnasta on ollut nopeampaa.

Päällystäminen, etenkin muovimatolla, hidasti kuivumista verrattuna päällystämättömään puoleen putkijaon keskellä. Betoni kuitenkin jatkoi kuivumista myös päällystettynä. Laatta oli jo suhteellisen kuiva, kun päällystys asennettiin. Päällystämättömän puolen kaikkien mittauspisteiden suhteelliset kosteudet laskivat alle 80 % RH:n mittaussjaksen aikana.

Kuivain ja lämmitin molemmat vaikuttivat positiivisesti kosteusvirran suuruuteen, joista kuivain toimi selvästi tehokkaammin. Molempia kokeiltiin myös syklisellä käynnillä, jolloin joko molemmat tai pelkkä lämmitin olivat ajastetusti päällä kuuden tunnin sykleissä. Paras tulos saatiin kuitenkin molempien ollessa jatkuvasti päällä. Erityisesti kuivaimen laittaminen ajastimen taakse pienensi kosteusvirran arvoa. Tulosten perusteella kuivaimen käyttö nopeuttaa huomattavasti betonin rakennusaikaisen kosteuden poistumista.

Tulilattian Fööni-kuivatusjärjestelmän kuivatusominaisuutta on suositeltavaa käyttää sovellutuksissa, joissa on tarve saada tehostetusti betonirakenteisiin sitoutunutta kosteutta pois. Sovellutusesimerkkejä ovat maasta alapohja- ja seinärakenteisiin nouseva kapillaarinen kosteus tai esimerkiksi uudiskohteen paksut betonivalut joilla on pitkä kuivumisaika sekä kaikki kohteet nopeampaan kuivumisaikaan pyrittäessä.

Lähdeluettelo

- [1] Haapaniemi, M. 2014. Vuotovahinkoselvitys 2012–2013, Finanssialan keskusliitto, 56 s.
- [2] Leivo, V., Rantala, J. 2008. Moisture Behaviour of slab-on-ground structures in operating conditions: Steady-state Analysis, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Construction and Building Materials 22, s. 526–531.
- [3] Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, 150 s.
- [4] Merikallio, T. 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, Suomen betonitieto, 62 s.
- [5] By45/BLY7: Betonilattiat 2002, Suomen Betoniyhdistys ry, Suomen Betonilattiyhdistys ry. 2002. Jyväskylä, 175 s.
- [6] Lehtimäki, P., Tommola, E. 2015. Talon lattioiden kuivattaminen ilmakiertoisella lattialämmityksellä, Tulilattia Oy, Passiivikivitalot, 5 s.

FF-WALL -seinäjärjestelmä

Jouni Eronen ja Asso Erävuoma
Finnfoam Oy

Tiivistelmä

FF-Wall -seinäjärjestelmä on rakennuksen ulkovaipan pienelementtijärjestelmä, joka soveltuu uudis- ja korjausrakentamiseen. Järjestelmä mahdollistaa julkisivulle arkkitehtuurisen valinnanvapauden. Lämmöneristyskyvyltään tehokkaiden eristeiden pinnoittaminen ja uudenlainen rakenneratkaisu mahdollistavat monimuotoisen ja joustavan tavan toteuttaa erilaisia julkisivuratkaisuja. Järjestelmä sopii erilaisiin runkoratkaisuihin. Pienelementit voidaan kiinnittää helposti puu-, teräs-, betoni- ja kevytbetonirunkoihin kullekin runkomateriaalille sopivia kiinnikkeitä käyttäen.

Pienelementit kiinnittyvät toisiinsa vaakasaumaan asennettavilla teräksisillä Z-lämpörankaprofiileilla, jotka jäykistävät rivit yhtenäiseksi rakenteeksi ja vastaanottavat seinälle kohdistuvan tuulikuorman. Tarvittaessa yksi asentaja voi asentaa seinäjärjestelmän, sillä kokonsa ja keveytensä vuoksi pienelementtejä on helppo työstää ja käsitellä.

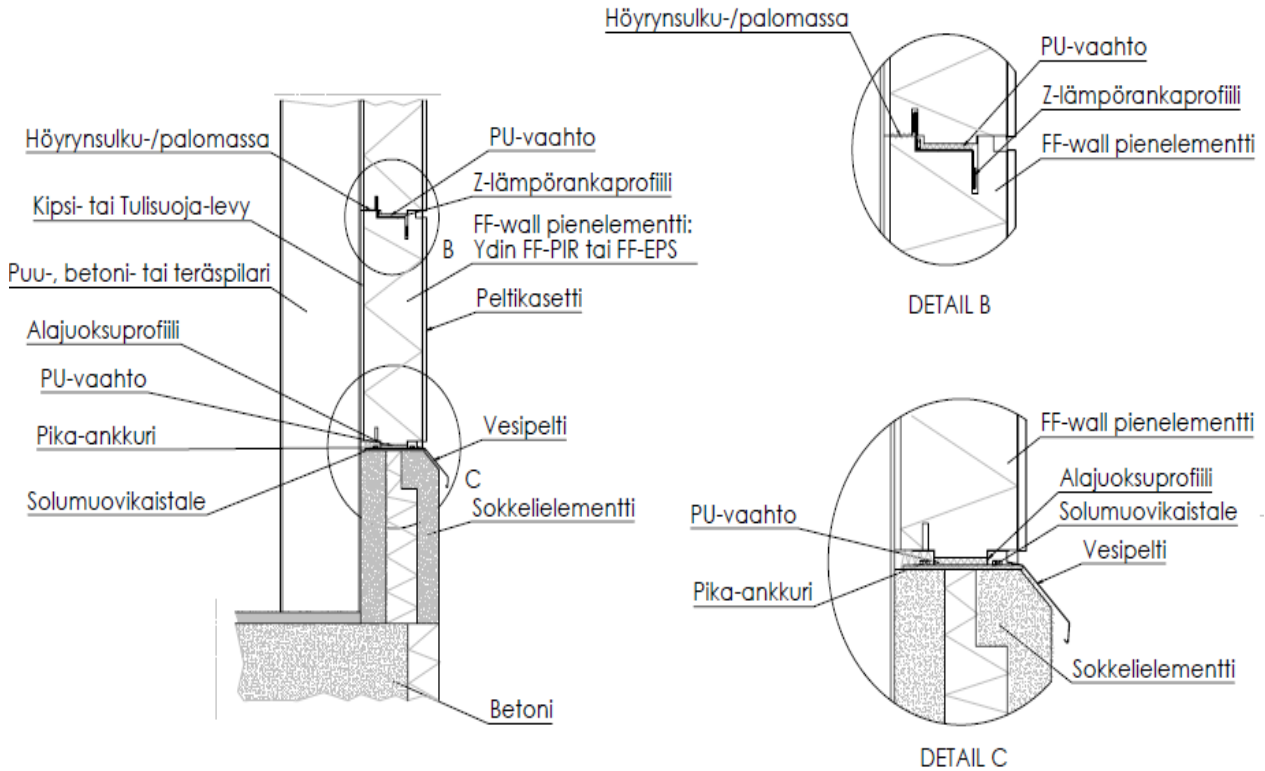
1. Johdanto

Rakentamisen toimintaympäristön vaatimukset asettavat julkisivulle monia haastavia näkökulmia. Sen lisäksi, että julkisivu sopii ympäröivään rakennuskantaan, halutaan, että eri materiaalipintoja voidaan yhdistää toisiinsa arkkitehtuurisesti joustavasti. Ulkovaipan on täytettävä sille asetetut tekniset vaatimukset. Rakennustyömaalla rakentajan etu on ulkovaipan asennuksen nopeus ja vaivattomuus sekä käyttäjälle mahdollisimman huoltovapaa julkisivu vuosiksi eteenpäin.

FF-Wall -seinäjärjestelmä on suunniteltu nämä kriteerit huomioiden. Pienelementtijärjestelmä, jossa on sekä ulko- että sisäpinta valmiina, vastaa joustavuudellaan ja monimuotoisuudellaan eri materiaalipintojen yhdistämisen haasteisiin. Seinärakenteen uudenlainen rakenneratkaisu luo edellytykset käyttää tätä järjestelmää eri tyyppisissä runkoratkaisuissa sekä uudis- että korjausrakentamisen kohteissa.

2. Järjestelmäkuvaus

FF-Wall -seinäjärjestelmä soveltuu runkoratkaisuihin, joissa erillinen ulkovaippa kiinnittyy rakennuksen runkoon. Järjestelmä koostuu valmiiksi pinnoitetuista pienelementeistä, joiden ytimenä toimii EPS tai PIR -lämmöneriste. Pienelementit kiinnittyvät rakennuksen runkoon yhtenäiseksi seinärakenteeksi teräksisellä kiinnitysprofiililla.



Kuva 1. FF-Wall -seinäjärjestelmän rakenneselitys.

2.1 Lämmöneriste

Seinäjärjestelmä koostuu joko 600 x 1200 mm tai 600 x 2400 mm pienenlementeistä. Ytimenä toimivat lämmöneristeaihiot on valmistettu hometurvallisista ja lämmöneristyskyvyiltään tehokkaista eristeistä - joko FF-EPS ($\lambda=0,031$ W/mK) tai FF-PIR -eristeistä ($\lambda=0,022$ W/mK) [1], [2]. Lämmöneristeaihio on multipontattu sivuiltaan, mikä takaa saumoiltaan tiiviin ja yhtenäisen lämmöneristyskerroksen seinärakenteessa. Lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnoille valitut pintaratkaisut on teollisesti kiinnitetty ja ovat sellaisenaan valmiita pintaa tai mahdollisimman pitkälle jatkojalostettuja. Eristepaksuus voidaan valita kohteen vaatimusten mukaan, joten eristetyypistä ja paksuudesta riippuen järjestelmällä päästään normitalon seinärakennevaatimuksista lähes nollaenergiarakennevaatimuksiin.

2.2 Kiinnitysprofiili

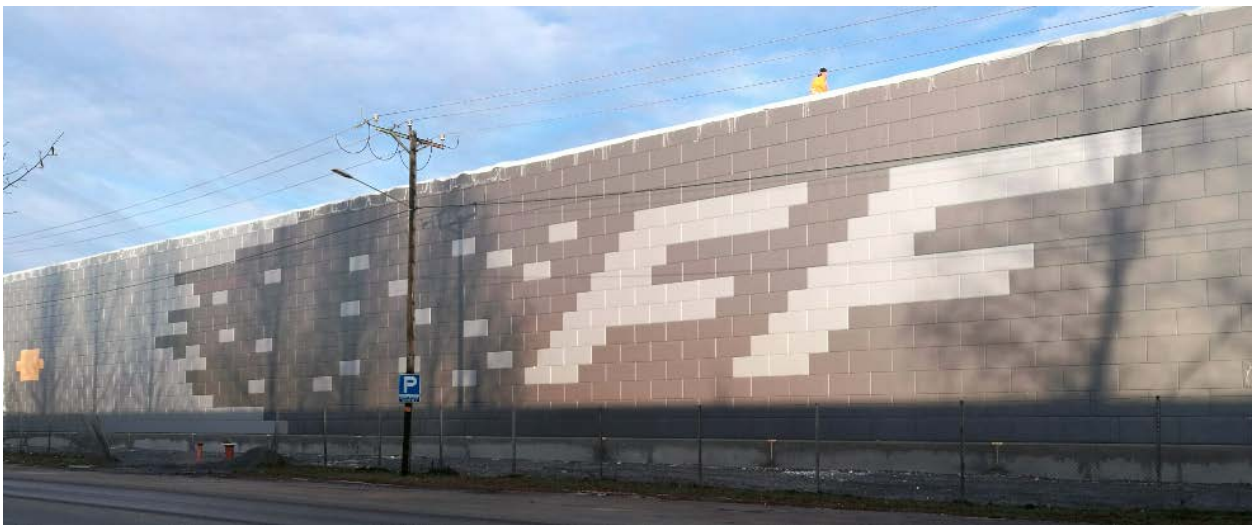
Pienenlementit kiinnitetään rakennuksen runkoon Z-lämpörankaprofiililla. Jokaiseen vaakasaumaan asennettava Z-profiili vastaanottaa seinäpinnalle kohdistuvan tuulikuorman ja jäykistää rivit yhtenäiseksi seinärakenteeksi. Z-profiilin uuma on termorei'itetty, mikä ehkäisee tehokkaasti kylmän siirtymistä teräprofiilissa. Lisäksi Z-lämpörankaprofiili jää kauttaaltaan lämmöneristeen sisään, joten seinärakenteeseen ei pääse syntymään kylmäsiltaa. Z-lämpörankaprofiilin paksuus mitoitetaan rungon tukipisteiden jännevälien mukaan. Profiilimuoto on suunniteltu siten, että ohuella seinämäpaksuudella maksimoidaan kiinnityspisteiden välinen etäisyys. Z-profiilin poikkileikkausmitat ovat 100 x 100 mm ja pituus on 3000 mm, josta n. 300 mm liittyy jatkoksen kohdalla [3].

Taulukko 1. Z-profiilin paksuus tukipisteiden jännevälien mukaan.

Z-profiilin paksuus	Tukipisteiden maksimi jänneväli
1,0 mm	3800 mm
1,5 mm	5700 mm
2,0 mm	6000 mm

3. Järjestelmän käyttökohteet ja pintavaihtoehdot

FF-Wall -seinäjärjestelmä on kehitetty luomaan valmista julkisivupintaa rakentamisen kaikille osa-alueille: teollisuus- ja varastorakennukset, liike- ja toimistorakennukset sekä asuinrakennukset. Järjestelmä soveltuu sekä uudis- että korjausrakentamiseen.



Kuva 2. FF-Wall -seinäjärjestelmä peltikasettipintaisena.

3.1 Pintavaihtoehdot

Järjestelmä mahdollistaa eri pintamateriaalien käytön ja antaa suunnittelijalle mahdollisuuden yhdistää joustavasti eri pintamateriaaleja ulkoseinärakenteessa. Pienelementin julkisivupinta voidaan teollisesti pinnoittaa teräskasetilla, kivipinnalla (keraamikomposiitti) tai koolata valmiiksi puuverhousta varten. Pinnoitteiden kiinnitysmenetelmät poikkeavat toisistaan siten, että peltikasetti liimataan kauttaaltaan kiinni eristeaihioon, kun taas kivipinta valetaan suoraan eristeen pintaan. Puupintaisiin ratkaisuihin pienelementit toimitetaan työmaalle koolauspuut liimattuina, joihin puupaneelit kiinnitetään vasta työmaalla pienelementtien asennuksen jälkeen.

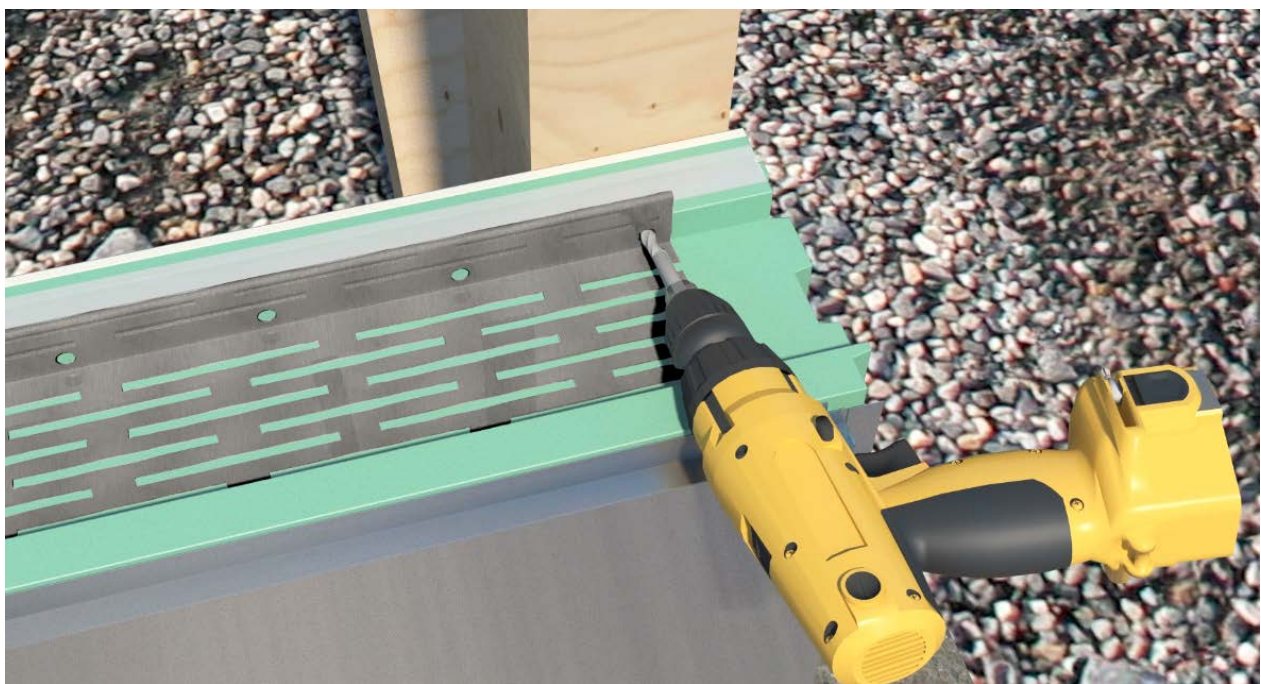
Pienelementin sisäpinnan toteutusvaihtoehtoja ovat kipsilevy, tulisuojalevy, kivipinta (keraamikomposiitti) tai puukoolaus sisäpaneelia varten. Levypintaisissa materiaaleissa kiinnitysmenetelmänä on liimaus eristeaihion sisäpintaan. Sisäpuolinen kivipinta saadaan aikaan valamalla massa suoraan eristeen pintaan. Puupanelointi kiinnitetään vasta työmaalla eristeaihion koolauspuihin, jotka ovat liimattu teollisesti pienelementteihin valmistuksen yhteydessä.

Järjestelmä mahdollistaa joustavasti myös uusien pinnoitusvaihtoehtojen toteuttamisen. Uusia pintamateriaalivaihtoehtoja ja niiden yhdistämistä toisiinsa testataan säännöllisesti. Pintavaihtoehtoja lisätään lähitulevaisuudessa oman tuotekehityksen tuloksena ja markkinoiden toiveiden mukaan.

P1 ja P2-paloluokan rakennuksissa pienelementtien verhospinta toteutetaan keraamikomposiittipinnalla, joka valetaan teollisesti eristeen pinnalle tai pinnoille. Keraamikomposiitin tarvittavaa paksuutta ja saumojen riittävää palosuojausta selvitetään paloluokkavaatimusten mukaisesti kolmannen osapuolen palotesteillä. Ulkoseinäjärjestelmän palotestejä tehdään omana testaustyönä järjestelmän paloturvallisuuden kehittämiseksi konsernin omassa palolaboratoriossa Salossa [4], [5], [6].

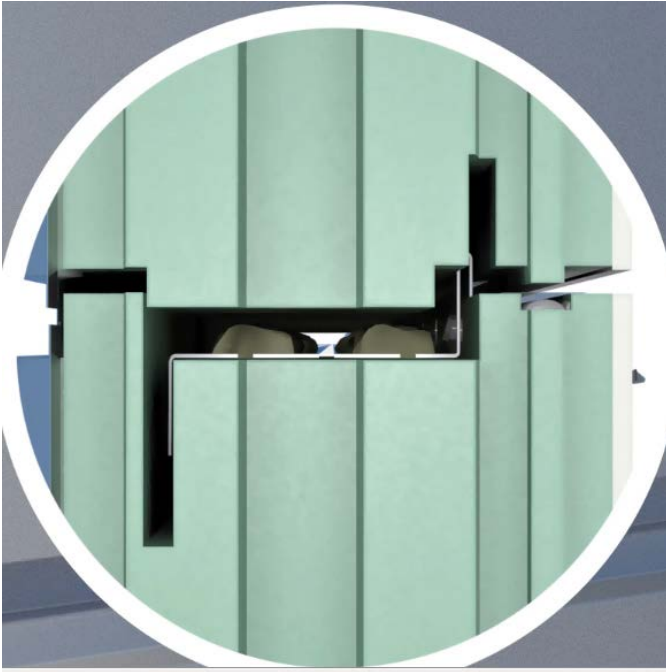
4. Asentaminen

Pienelementtien asentaminen aloitetaan perusmuurin päältä teräksisellä alajuoksuprofiililla. Seinäjärjestelmän asentaminen tapahtuu vaakasuuntaan rivi kerrallaan. Jokaisen pienelementtirivin vaakasaumaan asennetaan teräksinen Z-lämpörankaprofiili, josta seinärakenne kiinnitetään rakennuksen runkoon. Teräksinen Z-profiili kiinnitetään rakennuksen runkoon määritellyillä ruuveilla kiinnitysholkin läpi. Kiinnitysholkin avulla kaikki pienelementit kiinnittyvät runkoon samaan kireyteen. Profiilien liitoskohta tehdään tukevaksi limittämällä profiilit toisiinsa n. 300 mm matkalta, joten jatkoskohta voi sijaita vapaasti tukipisteiden välissä. Profiilin päälle varattu vaahdotustila täytetään PU-vaahdolla, mikä varmistaa rakenteen tiiviiden [7].



Kuva 3. Z-lämpörankaprofiilit kiinnitetään pienelementtien vaakasaumasta rakennuksen runkoon.

Seinärakenteen sisäpuolinen tiiviys varmistetaan tiivistemassalla. Pienelementin vaaka- ja pystysauman uraan on teollisesti levitetty tiivistemassa, joka levittyy asennusvaiheessa saumojen sisäpintaan. Tiivistemassa toimii saumarakenteessa höyrynsulkuna sekä palotilanteessa hidastaa palon etenemistä saumarakennetta pitkin.



Kuva 4. Pienementtien saumat tiivistetään PU-vaahdolla ja tiivistemassalla.

Pienelementit ovat kokonsa vuoksi kevyitä, joten niiden käsittely ja työstäminen ovat helppoa. Sopiva työkalu elementin leikkaamiseen valitaan pintamateriaalien mukaan. Eristeytimen leikkaamiseen käy perinteiset puutyökalut, esim. käsisaha. Asentaminen onnistuu tarvittaessa yhdeltä asentajalta, eikä asentamiseen tarvita järeää nostokalustoa. Saksilavanostimella on helppo asentaa elementtejä ja edetä asennuksen mukana. Iso nostin säästää työaikaa, koska siirrot minimoituvat pidempänä asennusulottuvuutena ja suurempana kantokykynä pienelementtejä lastattaessa.

5. Vaatimusten mukaisuus ja tuotesuojaus

FF-Wall -seinäjärjestelmän kaltaiselle tuotteelle ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia. Tämän vuoksi järjestelmälle on käynnistetty kolmannen osapuolen tuotesertifiointitoimenpiteet. Yrityksen kehittämän lämpörankaprofiilin ja lämmöneristysaihion yhdistelmä rakenteesta on myönnetty patenti.

6. Yhteenveto

FF-Wall on ulkoseinäjärjestelmä, joka perustuu pinnoitettujen lämmöneristeiden ja lämpörankaprofiilin yhdistelmään. Järjestelmä koostuu pontatuista pienelementeistä, joiden ytimenä toimii EPS tai PIR -lämmöneristeet. Pienelementit ovat kooltaan joko 600 x 1200 mm tai 600 x 2400 mm. Ne ovat kokonsa ja keveytensä vuoksi helppoja työstää ja käsitellä. Ulkopintavaihtoehtoja ovat peltikasetti, kivipinta (keraamikomposiitti) ja puuverhous. Sisäpintavaihtoehtoja ovat kipsilevy, tulisuojalevy, kivipinta (keraamikomposiitti) ja puuverhous. Pinnoitusvaihtoehtoja lisätään markkinoiden toiveiden mukaan ja oman kehitystyön tuloksena.

Teollisesti pinnoitetut pienelementit kiinnitetään rakennuksen runkoon teräksisellä Z-lämpörankaprofiililla. Z-profiilit asennetaan jokaisen pienelementtirivin vaakasaumaan sitomaan rivit yhtenäiseksi seinärakenteeksi ja vastaanottamaan julkisivulle kohdistuvaa tuulikuormaa.

Ulkoseinäjärjestelmä mahdollistaa pinnoitusvaihtoehtojen avulla erilaisten julkisivu- ja sisäpintaratkaisujen toteutuksen sekä varastorakennuksiin, liike- ja toimistorakennuksiin että asuinrakennuksiin. FF-Wall seinäjärjestelmä luo myös edellytykset toteuttaa ulkovaippa home- ja paloturvallisesti sekä energiatehokkaasti erilaisiin runkoratkaisuihin uudis- ja korjausrakentamisen kohteissa.

Lähdeluettelo

- [1] VTT Customer Report VTT-CR-05111-14/4.11.2014, Resistance of EPS insulation material to mould fungi.
- [2] PU Europe PU17-154, Report on mould growth on PU, MW and WF, commissioned by IVPU (March 2011)
- [3] Ramboll Oy, kehitystyöraportti, Lämpörangan tutkimustyö.
- [4] Tulisuoja Oy, Raportti TS/FE 27-16, Poltto 27, PIR-MgO-levy
- [5] Tulisuoja Oy, Raportti TS 02-16, saumarakenne PIR-pinnoitus keraamisella komposiitilla
- [6] Tulisuoja Oy, Raportti TS 01-16, PIR-pinnoitus keraamisella komposiitilla
- [7] FF-Wall -seinäjärjestelmän asennusohjeet.

Rakentamisen kuivaketjun varmistaminen teollisuusrakentamisessa – teräslevypintaistat sandwich-seinäelementit

Pasi Turpeenniemi ja Erkki Honkakoski
Ruukki Construction Oy

Tiivistelmä

Rakennusten kosteusongelmien yhteydessä puhutaan usein pelkästään kouluista, päiväkodeista ja asuinrakennuksista. Merkittävä osa rakentamisesta tapahtuu kuitenkin teollisella sektorilla ja on tärkeää, että kosteusriskit huomioidaan sielläkin. Teollisten rakennusten ulkoseinissä käytetään usein teräslevypintaista sandwich -elementtejä, joiden eristeet voivat olla alttiina sateelle ilman erillistä, työmaalla tehtävää suojausta. Valitettavan usein suojaus jää käytännössä tekemättä ja elementit altistuvat kastumiselle niiden asennuksen aikana. Niiden kuivumista on vaikea varmistaa enää asennuksen jälkeen. Ruukki on kehittänyt yksinkertaisen ratkaisun ongelmaan, joka poistaa elementtien suojaustarpeen työmaalta. Ratkaisu perustuu tehtaalla valmiiksi avoimen eristepinnan päälle asennettuun suojakalvoon, joka varmistaa, että elementit päätyvät kuivina seinärakenteeseen.

1. Johdanto

Rakentamisen kuivaketjun tulee olla aukoton, jotta rakennukset sekä ennen kaikkea niiden käyttäjät pysyvät terveinä. Ketju alkaa rakennuksen suunnittelusta ja kestää koko rakennuksen käyttöä. Rakennusten kosteusongelmista käytävä yleinen keskustelu on keskittynyt pääosin asuinrakentamiseen sekä kouluihin ja päiväkoteihin, mutta ongelmakohtia ja parannettavaa löytyy myös teollisuusrakentamisesta. Teollisuusrakennusten rakenneratkaisut ja koko ovat pääsääntöisesti sellaisia, että rakennuksen 'huputtaminen' rakennusvaiheessa on lähes mahdotonta. Siksi teollisuusrakentamisessa käytettävien materiaalien ja esivalmistettujen komponenttien tulisi olla sellaisia, että ne eivät tarvitse erillistä sadesuojausta. Tässä artikkelissa keskitytään Suomessakin hyvin yleisesti käytettyihin teräslevypintaisiin sandwich – seinäelementteihin.

2. Sandwich–seinäelementtien kuivaketju

Elementti koostuu kahdesta maalipinnoitetusta teräsohutlevystä sekä niiden välissä olevasta eristekerroksesta. Eristeen ja pintalevyjen välissä oleva liimasidos yhdistää materiaalit jäykäksi liittorakenteeksi. Eristemateriaali on joko mineraalivillaa, polyuretaania tai polystyreeniä. Elementit asennetaan tyypillisesti vaakasuuntaisesti ja kiinnitetään päistään rakennuksen runkopilareihin. Suomessa käytettävissä elementeissä ylivoimaisesti suosituin eristemateriaali on mineraalivilla. Näitä käytetään tyypillisesti hallimaisissa rakennuksissa, kuten esimerkiksi logistiikkarakennuksissa



Kuva 1. Teräslevypintainen sandwich -seinäelementti.

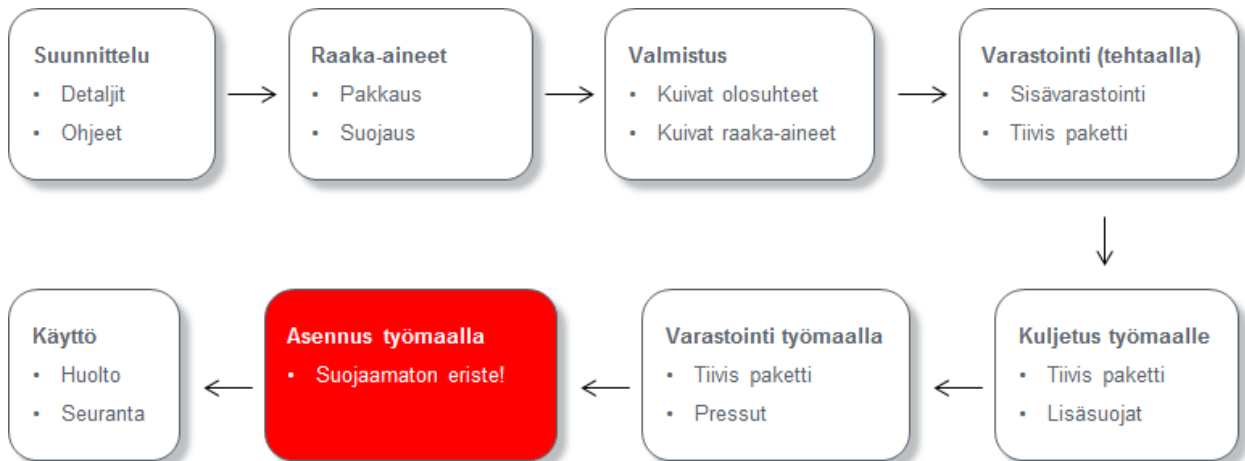
2.1 Haasteet sandwich -seinäelementin kuivaketjussa

Saimme erään sateisen syksyn aikana useita kyselyitä asiakkailtamme elementtien kuivumisominaisuuksista. Syynä kyselyihin oli yleensä se, että elementtien yläreuna (ns. urosponntti) oli jätetty asennusten aikana sekä työpäivän päätteeksi suojaamatta. Sateisen yön jälkeen villa vaikutti läpimärältä. Rakennustyömaiden valvojat vaativat urakoitsijoilta toimenpiteitä villojen kuivattamisesta ennen asennusten jatkamista. Elementtien kastumisen taustalla oli, kohteesta riippuen, inhimillisiä virheitä (unohduksia), mutta myös huolimattomuutta tai jopa välinpitämättömyyttä.



Kuva 2. Sateen kastelema elementin yläreuna.

Palautteen perusteella perehdyimme perusteellisesti elementin elinkaaren kuivaketjun näkökulmasta ja heikko lenkki löytyi juurikin rakentamisvaiheesta. Ilman työmaalla tapahtuvaa sadesuojausta kuivaketju katkeaa elementtien asennusvaiheessa. Mikäli eristeen päälle kertynyttä vettä, lunta tai sohjoa ei poisteta ennen seuraavan elementin asentamista, jää vesi ponttirakenteen sisälle eristemateriaalista riippumatta. Riski on merkittävä erityisesti mineraalivillaeristeissä elementeissä, mutta myös polyuretaani- sekä polystyreenieristeisissä elementeissä



Kuva 3. Kuivaketjun toteutuminen sandwich –elementin elinkaaren aikana.

2.2 Ratkaisu sandwich -seinäelementin kuivaketjun varmistamiseksi

Elementit voidaan toki suojata työmaalla asennuksen eri vaiheissa erillisillä pressuilla ja suojamuoveilla, mutta niiden käyttö jää täysin asentajien vastuulle ja työmaan valvottavaksi. Kuten asiakaspalautteen perusteella huomasimme, nämä menetelmät eivät aina käytännössä toimi ja kuivaketju jää varmistamatta. Oli toisin sanoen selvää, että elementtien eriste pitää suojata valmiiksi jo tehtaalla, jolloin työmaalla ei tarvitse kiinnittää siihen enää erikseen huomiota.

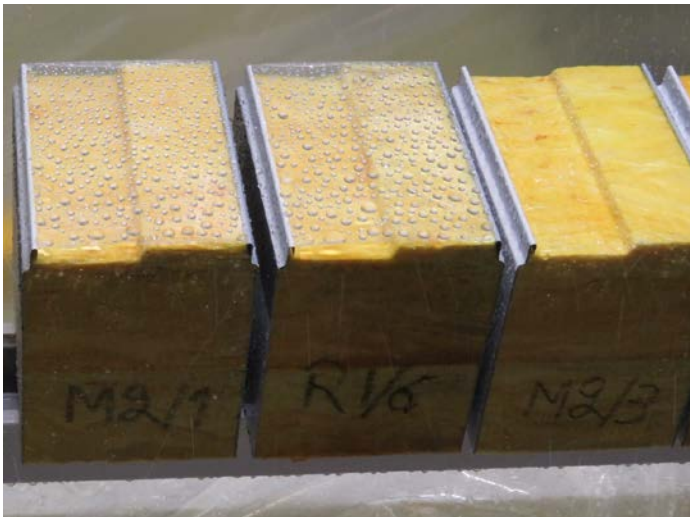
Tutkimme eri vaihtoehtoja elementin villareunan suojaamiseksi. Suojausmenetelmän tuli olla yksinkertainen, edullinen ja luotettava. Tutkimme ja testasimme ensin pitkään erilaisia kemiallisia suojausmenetelmiä, mutta ne todettiin HAMK:in järjestämissä pitkäkestoisissa sadetustesteissä riittämättömiksi. Päädyimme lopulta mekaaniseen suojaukseen, jossa elementin yläreunaan asennetaan tehtaalla valmiiksi suojakalvo. Suojakalvo poistetaan vasta elementin asentamisen jälkeen, juuri ennen seuraavan elementin asentamista. Kalvo on UV-suojattu ja kiinnitetty niin lujasti, että se suojaa esimerkiksi räystäällä olevan ylimmän elementin eristettä jopa kuukausien ajan.



Kuva 4. Elementin yläreunan sadesuoja.

Tutkimme sadetustesteissä myös veden imeytymistä eristeeseen elementtien pystysuuntaisista päädyistä arvioidaksemme tarvetta myös niiden suojaamiselle. Testien perusteella kuitenkin

selvisi, että mineraalivillan vedenhylkivyyssominaisuus riittää estämään veden imeytymisen eristeeseen pystypinnoilla, joissa vesi ei jää 'makaamaan' tai lammikoitumaan eristeen päälle vaan pääsee valumaan vapaasti pois. Vedenhylkivyyssominaisuuden todettiin testeissä toimivan myös vaakapinnoilla lyhytkestoisesti (elementin yläreunassa) - vesi pisaroituu eristeen pintaan. Veden jäädessä elementin pintaan pidemmäksi aikaa (>30min) se alkaa kuitenkin hitaasti tunkeutua eristeen sisälle. Käytännössä lyhytkestoisenkin sateen jälkeen veden haihtuminen eristeen vaakapinnoilta kestää niin pitkään, että vesi ehtii imeytyä osittain eristeeseen. Tulosten perusteella päädyimme ratkaisuun, jossa vain elementin yläpintaan lisätään tehtaalla suojakalvo.



Kuva 5. Elementtejä sadetustestissä. Vesi imeytyy suojaamattomaan elementtiin (3. vasemmalta).

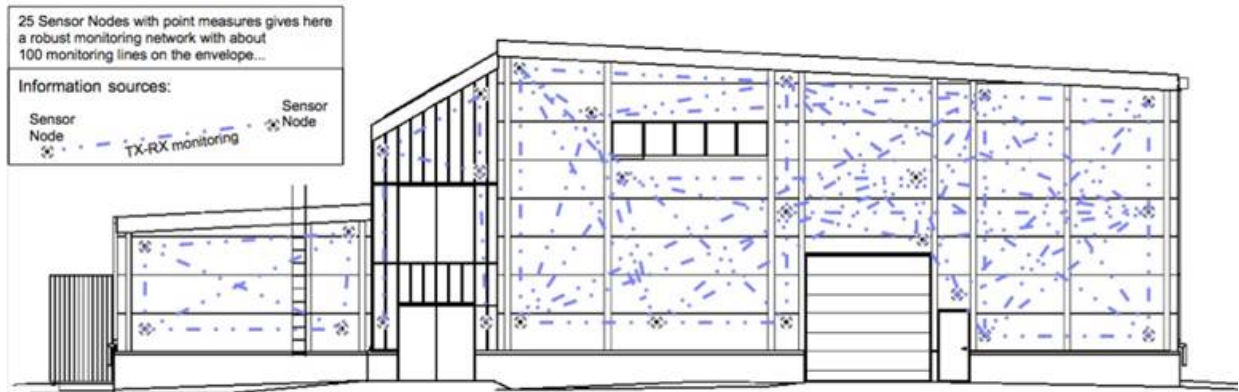
Elementin reunasuojauksen hyödyt:

- Poistaa elementtien rakennusaikaisen sadesuojaustarpeen työmaalta
- Varmistaa, että asennetut elementit ovat kuivia
- Vähentää valvontatarvetta työmaalla

2.3 Jatkotoimenpiteet ja -kehitys

Elementin reunasuojaus lanseerataan markkinoille syksyllä 2017 ja kehitämme parhaillaan kuivaketjun seuraavaa vaihetta, eli sensoriteknologiaan perustuvaa elementtien kosteuspitoisuuden seurantamenetelmää. Tällöin voidaan mittaustiedon ja seurannan avulla varmistua elementtien kunnosta joka vaiheessa ja että mahdollisesti huonosti kohdellut elementit eivät pääse pilaamaan valmista rakennusta – aiemmin helposti piiloon jääneet tai piilotetut virhetilanteet voidaan sekä ajoittaa että paikantaa. Kuivaketjuelementtiin integroitu järjestelmä sekä mittaa ja seuraa säännöllisesti rakennuselementin olosuhteita tehtaalta työmaalle ja valmiiseen rakennukseen lopullisesti varmistaen kuivaketjun.

Sensoritekniikka voi tuntua kalliilta ja lyhytaikaiselta investoinnilta pelkästään elementtien rakennusaikaiseen seurantaan ja käyttöön. Kuivaketjussa käytettävää elementtien sensori-investointia voidaan jatkokäyttää valmiissa rakennuksessa edelleen rakennuksen käytönaikaiseen seurantaan. Sensorit muodostavat rakennuksen vaippaan mittausverkon, jolla voidaan varmistaa elementeistä kasatun rakennusvaipan toimivuus ja kunto useammalla tavalla. Mittausverkolla voidaan havaita ja paikallistaa myös äkillisiä vikoja tai muutoksia ja potentiaalisia ongelmakohtia tai esimerkiksi paikallisia vuotoja rakennuksen vaipassa vaikka juuri sillä vuodon kohdalla ei sattuisikaan olemaan paikallista sensoria.



Kuva 6. Sensoreiden muodostama mittausverkosto.

Elementtien rakennusaikainen seurantajärjestelmä sopii hyvin jatkokäytettäväksi rakennuksen pitkäaikaisen kunnonvalvonnan apuna ja tukea mahdollisia ongelmien havaitsemista rakennuksen teknisten järjestelmien käytössä ja säädössä tai muutoksissa ennen kuin ongelmat ehtivät aiheuttaa suurempaa vahinkoa rakennukselle tai ihmisille.

3. Yhteenveto

Terve rakennus tehdään kuivista materiaaleista ja tämä pätee myös teollisuusrakennuksiin. Inhimilliset virheet ja huolimattomuus voivat johtaa kuitenkin siihen, että rakennusmateriaalit pääsevät kastumaan rakennusvaiheessa. Riskin eliminointiseksi teollisuusrakentamisen tuotteiden tulisi itsessään olla niin hyvin suojattuja, että erillistä sadesuojausta työmaalla ei tarvita. Teollisuusrakennuksissa usein käytettävissä teräspintaissa sandwich –elementeissä oleva eriste on suojaamattomana altis kastumiselle. Tämä pätee erityisesti mineraalivillapohjaisille elementeille, mutta myös polyuretaani- ja polystyreenipohjaisille elementeille. Mineraalivilloille ominainen vedenhylkivyyssominaisuus ei ole riittävä estämään eristeen vaakapinnoille kertyvän veden imeytymistä eristeen sisälle. Ruukin kehittämä ratkaisu poistaa teräspintaisten sandwich –elementtien sadesuojaustarpeen työmaalla. Ratkaisu perustuu tehtaalla valmiiksi eristekerroksen suojaksi asennettavaan suojakalvoon.

Kuivaketjun parantamiseksi ja varmistamiseksi tehdään myös jatkotoimenpiteitä, joilla varmistetaan kuivaketjun toimivuus toistuvien mittauksien sekä elementeistä, että valmiista rakennuksesta. Terve rakennus myös pysyy kuivana valmistumisen jälkeen sen käytön aikana. Elementtien kuivaketjua laajennetaan rakennuksen vaipan toimivuuden seurantaan. Teollisuudessa terveyden lisäksi myös toimivuus, helppokäyttöisyys, tehokkuus ja tuottavuus ovat erityisen tärkeitä seikkoja ja asettaa lisähaasteita rakennukselle. Tavoitteena on entisestään nostaa rakennusten laatua ja hyödyttää rakennuksen arvon säilymistä lisäksi sen toimivuuden sekä käytettävyyden parannuksia rakennuksen elinkaaren ajalle.

Temperierung-menetelmä ja sen soveltaminen massiivirakenteisten seinien kosteusteknisissä korjauksissa

Jani Sorasalmi¹

¹IdeaStructura Oy

¹Aalto-yliopisto

Tiivistelmä

Tämä artikkeli on lyhyt katsaus samannimiseen temperierung-menetelmää käsittelevään diplomityöhön, joka on tehty vuoden 2017 aikana. Temperierung on Saksassa kehitetty menetelmä, jossa rakenteita ja sitä kautta huonetilaa lämmitetään tyypillisesti seinän alareunaan asennettujen lämmitysputkien välityksellä. Vaikka menetelmä soveltuukin monien lähteiden mukaan lämmitys- ja ilmastonhallintajärjestelmäksi, oli työn pääpainona sen soveltaminen kosteusongelmaisten rakenteiden korjausmenetelmänä. Rakenteita lämmittämällä voidaan siis parantaa niiden kuivumiskykyä ja siirtää esimerkiksi kapillaarisen kosteuden haihtumisrintama rakenteen pinnasta syvemmälle rakenteen sisälle. Näin rakenteissa olevan kosteuden aiheuttamia ongelmia voidaan ehkäistä ilman, että kosteusvirtaa välttämättä katkaistaan. Vaikka menetelmä vaatii jatkuvaa energiankäyttöä, kompensoituu se ainakin osittain rakenteiden lämmöneristävyuden parantumisen ja huonetilaan suuntautuvan säteilylämmityksen johdosta. Myös lämpöviihtyvyys paranee yleensä viileämmäksi koetussa lattian rajassa. Menetelmän energiatehokkuus ja sitä kautta sen soveltuvuus lämmitysjärjestelmäksi jakaa kuitenkin tutkijoiden mielipiteitä. Käyttötarkoituksesta riippumatta ovat lähtötiedot ja järjestelmän suunnittelu avainasemassa onnistuneen korjauksen tai lämmitysjärjestelmän luomiseen.

1. Johdanto

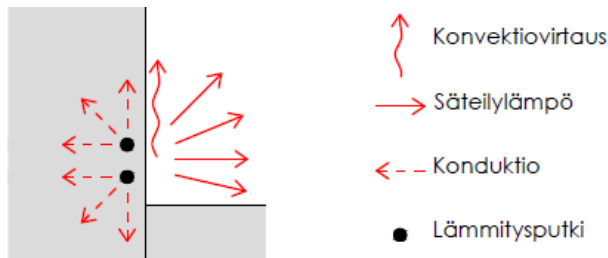
Saksassa 1980-luvulla museaalisten rakennusten korjaamiseen kehitetyn temperierung-menetelmän on esitetty soveltuvan muun muassa rakennusten ilmastonhallintaan, kosteusongelmien korjaamiseen sekä lämmitysjärjestelmäksi [1]. Suomessa menetelmä on jäänyt muutamia lyhyitä artikkeleita ja kokeiluluontoisia asennuksia lukuun ottamatta suhteellisen vähälle huomiolle. Menetelmän tarkoituksena on rakenteiden lämmittäminen seinärakenteeseen upotettujen lämmitysputkien tai -kaapeleiden avulla. Tämän artikkelin pääpaino on rakenteisiin johdetun lämpöenergian käyttäminen kosteusongelmaisten rakenteiden kuivattamisessa sekä kosteudenhallinnassa. On kuitenkin huomioitava, että temperierung-järjestelmä myös lämmittää kosteusvaurioista kärsivää rakennusta ja vaikuttaa siten sen sisäilmastoon aina ollessaan käytössä.

2. Temperierung-menetelmä

Temperierung-menetelmässä asennetaan ulkoseinien alaosiin tai ikkunoiden alapuolelle yleensä vesikiertoisia lämmitysputkia, jotka sekä lämmittävät että kuivattavat rakennetta. Tyypillisesti kaksi lämmitysputkilinjaa (tulo ja poisto) asennetaan yleensä kivirakenteisten seinien sisäpuolelle rappauksen tai mahdollisesti betonin sisälle. Joissakin tapauksissa temperierung-menetelmää on toteutettu myös seinän pintaan tai erillisen kotelon sisälle asennetuilla putkilla. Temperierung-menetelmä eroaa perinteisestä koko seinän kattavasta seinälämmityksestä muodostamalla seinän pituussuuntaisen viivamaisen lämmityksen. Monta vierekkäin asennettua kyseisen menetelmän mukaista lämmityskaapelia muodostaisivat siis tavalliseen seinälämmitykseen verrattavan lämmönlähteen.

Temperierung on verrattavissa vesikiertoiseen patterilämmitysjärjestelmään ilman pattereita, jossa lämmitettävä kiertovesi kulkee putkessa seinän alareunassa ja kääntyy seinälinjan päätyttyä takaisin kuljettaen matkan aikana jäähtyneen veden lähtöpisteeseen. Ideana on lämmittää seinärakennetta huoneilman sijasta ja näin ollen ikään kuin eristää huoneen sisäilmasto ulkoilmasta sekä ehkäistä kylmän seinän aiheuttamia kosteusongelmia. Lämmitetyn seinärakenteen on myös todettu johtavan tasaisempiin sisäilmasto-olosuhteisiin. [2]

Temperierung-menetelmän toteutustavat voidaan jakaa kolmeen ryhmään lämmitysputkien erilaisten asennustapojen perusteella. Putket voidaan asentaa joko rakenteen sisälle, pinnalle tai erillisen kotelon sisälle. Käytettävän toteutustavan valintaan voivat vaikuttaa muun muassa haluttu rakennusfysikaalinen toimintatapa, seinän materiaali sekä ulkonäköseikat. Kuvan 1 mukainen lämmitysputkien upottaminen rakenteen sisälle lienee toteutustavoista yleisimmin käytetty ja menetelmän kehittäjän Großschmidtin mukaan myös optimaalisin. Vaikka kyseinen toteutustapa vaatii lieviä rakenteita rikkovia toimenpiteitä, mahdollistaa se kuitenkin lämmön johtumisen lämmitysputkesta suoraan rakenteisiin ilman eristävää ilmakerrosta välissä. [3]



Kuva 1. Tyypillisen seinärakenteen sisälle upotetun temperierung-menetelmän periaatepiirros.

2.1 Fysikaaliset perusteet

Temperierung-menetelmässä lämpö siirtyy rakenteisiin ja sitä kautta huoneilmaan aina sekä konduktion, konvektion että säteilyn välityksellä. Menetelmän toteutustavasta riippuu, mikä tai mitkä lämmönsiirtymistavoista ovat hallitsevia. Tapauksesta riippuen joku siirtymistapa voi myös jäädä häviävän pieneksi. Osa lämpöenergiasta siirtyy johtumalla seinän läpi suoraan ulos. Energiahäviön suuruuteen vaikuttaa seinän rakenteen lisäksi asennuspaikan läheisyys maanpinnantasoon ja edelleen ulkoilmaan; kellaritilojen maanvastaisissa rakenteissa käytettynä lämpöhukat ovat pieniä. Seinään johtuva lämpöenergia kuitenkin myös kuivattaa rakenteita, mikä puolestaan pienentää materiaalien lämmönjohtavuutta. Kuivumisen vaikutus lämmönjohtavuuteen on merkittävä erityisesti hygroskooppisilla materiaaleilla [4] ja kun liikutaan kapillaarisen veden kyllästäväällä alueella. Materiaalin kosteuspitoisuuden vaikutus sen lämmöneristävytyteen riippuu olennaisesti kyseisen materiaalin ominaisuuksista, kuten hygroskooppisuudesta, tiheydestä ja huokosrakenteesta.

Kuvan 1 mukaisessa tapauksessa massiivisen seinämateriaalin sisälle upotetusta putkesta lämpöenergia siirtyy seinärakenteisiin vain konduktion välityksellä. Homogeenisessa seinämateriaalissa energiaa johtuu kaikkiin suuntiin, jolloin putken ympärille syntyy muuta rakennetta selvästi lämpimämpi vyöhyke. Tässä vyöhykkeessä oleva lämmennyt seinän sisäpinta säteilee lämpöenergiaa seinärakennetta viileämpään huoneeseen. Seinästä siirtyy lämpöä konduktion välityksellä myös seinän pinnalla olevaan ilmassaan, josta se kulkeutuu yksidimensioisen konvektiovirtauksen mukana ylöspäin. Coanda-ilmiön johdosta konvektiovirtaus pysyy seinän pinnalla ja levittää lämpöenergiaa koko yläpuolisen seinän pinta-

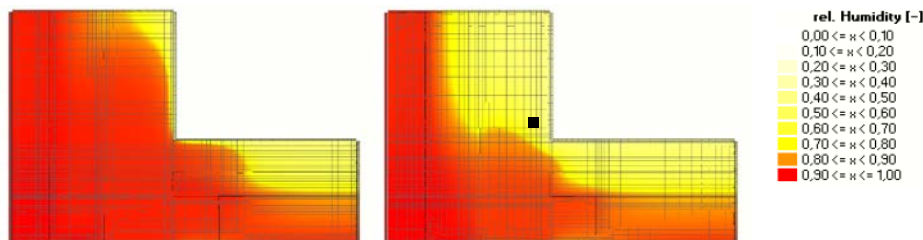
alalle. Seinän vierustalla kohoavan ilman lämpötilan nousu johtaa myös sen suhteellisen kosteuspitoisuuden alenemiseen. Näin ollen seinän pinnalla virtaa lämmintä ja kuivaa ilmaa, mikä vahvistaa diffuusiota kostean seinän ja kuivemman ilmassan välillä. [1]

Koska osa seinään johdetusta lämpöenergiasta siirtyy huoneeseen seinän lämpimän pinnan aiheuttaman lämpösäteilyn välityksellä, on huonetilassa koettu operatiivinen lämpötila suurempi, kuin vastaavassa kylmien seinien ympäröimässä tilassa [1]. Tämä mahdollistaa sisäilman lämpötilan pienentämisen ilman, että asukkaiden lämpöviihtyvyys huononee. Rakenteiden kautta ohjautuvaa säteilylämpöä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi puolilämpimissä tiloissa.

2.2 Temperierung-menetelmällä toteutettu kosteudenhallinta

Vaikka temperierung-menetelmä kehitettiin alun perin museoiden lämmitysjärjestelmäksi, on sen soveltuvuus huomattu myös korjausrakentamisen puolella. Großesmidtin mukaan temperierungia voidaan käyttää korjausmenetelmänä, joka yhdistää kosteudenhallinnan, lämmityksen ja ilmastonhallinnan yhdeksi yksinkertaiseksi kokonaisuudeksi [1]. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että käytettäessä temperierung-menetelmää esimerkiksi kosteusongelmien korjaamiseen, tulee rakennusta lämmittävä ja sisäilmaa stabiloiva vaikutus joka tapauksessa sivutuotteena. Lämmitysputkien tai -kaapeleiden käyttäminen kosteudenhallintamenetelmänä perustuu rakenteiden kuivumiskyvyn parantamiseen lämmittämällä. Pysyvästi asennettuna ja oikein mitoitettuna temperierung-lämmitysputkijärjestelmä myös pitää rakenteet kuivina, ellei uusia merkittäviä kosteuslähteitä ilmaannu. Lämpimänä pidetty seinän sisäpinta myös ehkäisee kondensoitumisesta aiheutuvia kosteusongelmia ja näin ollen estää mikrobien ja homeen kasvamista rakenteiden pinnoilla.

Maanvastaisten seinien alareunaan asennettujen lämmitysputkien on todettu toimivan myös eräänlaisena kevytrakenteisena kapillaarikatkona [5]. Kirjallisuudessa kapillaarikatko-nimitystä on käytetty, vaikka menetelmä ei muodostakaan fyysistä kapillaarisen kosteusvirran katkaisevaa kerrosta. Tätä on perusteltu sillä, että oikein mitoitetuilla lämmitysputkilla voidaan estää kapillaarisen veden pääsy nestemäisessä muodossa halutun vyöhykkeen läpi. Viivamainen lämmin kaista seinän alareunassa siirtää kapillaarisen veden haihtumisen seinärakenteen pystysuoralta pinnalta syvemmälle seinän sisälle vaakasuoraksi haihtumisrintamaksi. Haihtunut vesihöyry poistuu rakenteesta diffuusion välityksellä ja näin ollen lämmitetyn kaistan yläpuolisen osan kosteuspitoisuus laskee. Näin luotu kapillaarisen kosteusvirran katkaiseva vyöhyke siis kuivattaa rakenteen pintaosat kuvan 2 mukaisesti ilman fyysistä kapillaarikatkokerrosta. Vastaava vaikutus saataisiin asentamalla rakenteeseen kosteutta läpäisemätön kapillaarikatko, joka useissa tapauksissa vaatisi kuitenkin huomattavasti suurempia korjaustoimenpiteitä.



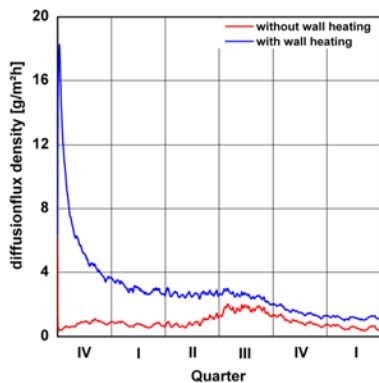
Kuva 2. Lämmitysputkella (10 W/m) kuivatettu kapillaarinen kosteusvirta betonisandwich-seinässä. Vasemmalla märkä seinärakenne ilman lämmitystä ja oikealla lämmitetty rakenne.

Diplomityötä varten tehtyjen RF-mallinnusten perusteella pelkästään seinän alareunaan asennetut

lämmitysputket kuivattavat monissa tapauksissa tehokkaasti kapillaarista kosteusvirtaa, mutta eivät välttämättä ehkäise muista syistä suoraan seinän läpi horisontaalisesti siirtyvää kosteutta. Laajempialaisille kosteusongelmille voidaan kehittää ratkaisuja jakamalla lämpöä tasaisemmin koko seinän alalle tavanomaisen seinälämmityksen tapaan. Esimerkiksi menoputken mennessä seinän alareunassa voidaan paluuputki asentaa seinän keskivaiheille, mikä jakaa lämpöenergiaa ja näin ollen lämmittää sekä kuivattaa seinää laajemmalla alueella. Edellä mainituista syistä kosteuslähteen perusteellinen selvittäminen helpottaa huomattavasti temperierung-korjauksen suunnitteluprosessia.

Maanvastaisia rakenteita lämmitettäessä niiden kuivuminen tapahtuu pääasiallisesti sisäilmaan päin, minkä johdosta käytettävien sisäpuolisten pinnoitteiden käyttöön onkin kiinnitettävä erityistä huomiota. Jotta kuivuminen tapahtuisi tehokkaasti, on suositeltavaa käyttää pienen vesihöyrynvastuksen omaavia hengittäviä pinnoitemateriaaleja. Erityisen pahasti kastuneissa rakenteissa voi myös olla suositeltavaa jättää seinän sisäpinta kokonaan pinnoittamatta ensimmäisten lämmityskuukausien ajaksi. Kuvassa 3 on havainnollistettu temperierung-menetelmän vaikutusta rakenteista sisätiloihin suuntautuvaan kosteusvirtaan. Mallinnuksen perusteella kosteusvirta sisätiloihin kasvaa huomattavasti varsinkin alkuvaiheessa, mikä viittaa kostean rakenteen nopeaan kuivumiseen. Joissakin tapauksissa kosteusvirta voi jäädä pysyvästi koholle johtuen lämmentyneen maaperän huokosilman vesihöyrynpitoisuuden noususta.

Lämmitetyssä vyöhykkeessä haihtuva kosteus kulkeutuu siis voimistuneen diffuusion vaikutuksesta huoneilmaan ja siitä ilmanvaihdon mukana ulos. Tämän johdosta on kiinnitettävä huomiota pintamateriaalien lisäksi huonetilan ilmanvaihtoon erityisesti kuivatuksen alkuvaiheessa. Veden haihduttamiseen rakenteista kuluu myös energiaa, mikä näkyy joko vaadittavana lämmitysputkien lisätehona tai hillitympänä rakenteiden lämpötilan nousuna kuivumisen alkuvaiheessa.



Kuva 3. Diffuusiovirran voimakkuus sisätiloihin käytettäessä temperierung-menetelmää kapillaarikatkona. Ylempi viiva kuvaa lämmitettyä rakennetta ja alempi lämmittämätöntä. [5]

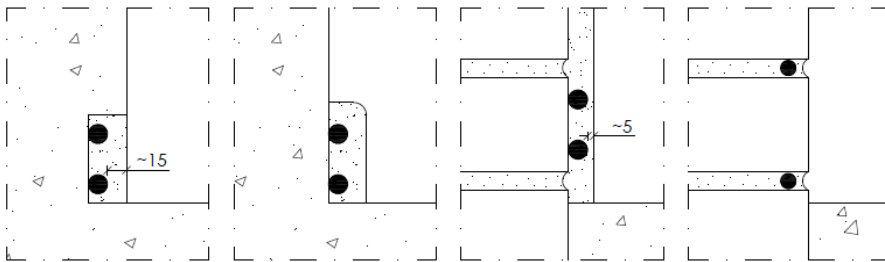
2.3 Mitoitus ja suunnittelu

Kuten muissakin lämmitys- ja korjausmenetelmissä, on myös temperierung-järjestelmässä sen suunnittelu ja mitoitus tärkeässä roolissa. Oikealla mitoituksella voidaan varmistaa menetelmän optimaalinen energiankulutus sekä toimivuus halutussa kohteessa. Koska jokainen kohde on yksilöllinen, on mitoituksen ja suunnittelun tukena suositeltavaa käyttää siihen soveltuvaa mallinnusohjelmaa sekä saatavilla olevaa kokemukseräistä tietoa. Pahimmassa tapauksessa voidaan väärällä mitoituksella päätyä lämmittämään kostea seinä kuitenkin kuivattamatta sitä. Tällainen tilanne voi johtaa jopa haitallisten homekasvustojen olosuhteiden parantamiseen.

Suunnitteluvaiheessa on hyvä myös vertailla temperierung-menetelmää muihin ratkaisuihin ja löytää optimaalisin korjaus- tai lämmitysmenetelmä.

2.4 Asennus

Tyypillisin asennuspaikka temperierung-lämmitysputkille on ulkoseinän alareuna, mihin putket voidaan joko piilottaa seinämateriaalin sisälle tai jättää esille seinän pinnalle. Yksinkertaisin asennustapa on luonnollisesti seinän pinnalle, jolloin seinään tarvitsee porata vain kiinnikkeiden reiät. Seinän pinnalle asennettava putki asettaa mahdollisesti kuitenkin ulkonäöstä aiheutuvia rajoituksia asennuksiin. Menovesiputki on tyypillisesti asennettu seinän alareunaan ja paluuputki sen yläpuolelle, jolloin lämmitys kohdistuu mahdollisimman lähelle lattianrajaa [1].



Kuva 4. Esimerkkejä erilaisista betonin tai laastin sisään asennettavien lämmitysputkien toteutustavoista. Lämmitysputket voidaan asentaa myös kokonaan tai osittain näkyviin.

Kuvan 4 mukaisesti voidaan seinään upotetut putket asentaa joko seinämateriaalin tai rappauksen sisälle. Historiallisissa rakennuksissa, joissa vältellään seinämateriaalin rikkomista, voidaan putki asentaa myös vanhan seinärakenteen alareunaan rappauksesta tai betonista tehtävän listan sisälle. Betonirakenteissa tulee varmistaa seinän riittävä paksuus, jotta upotuksen voi tehdä; ohuemman kantavan seinän raudoitukset rajoittavat asennusroilojen tekoa. Seinän pinnalle tulevat putket voidaan asentaa joko seinään kiinni tai irti seinästä riippuen halutusta toimintatavasta. Tarvittaessa järjestelmä voidaan lattialämmitysputkien tavoin varustaa myös vuodonilmaisimin.

2.5 Taloudellisuus ja energiankulutus

Temperierung-järjestelmän asennuskustannukset asuinrakennuksissa on arvioitu vastaaviksi tai joissakin tapauksissa jopa pienemmiksi kuin perinteisillä radiaattoripatterilämmitysjärjestelmillä [6]. Lisäkulujen aiheutuminen temperierung-järjestelmän asennuksen jälkeen on kuitenkin vielä kiistanalaista. Esimerkiksi Großschmidtin [1] mukaan menetelmä aiheuttaa säteilyyn perustuvan lämmityksen ja rakenteiden kuivumisen myötä säästöjä, kun taas Lötherin [7] mukaan käyttäjän on varauduttava menetelmää käyttäessään suurempiin energiakustannuksiin. Käytettäessä temperierungia kosteudenhallintamenetelmänä, kompensoituu ainakin osa käyttökuluista muiden lämmönlähteiden energiansäästöllä. Temperierung-korjausmenetelmän kustannukseksi voidaan siis laskea asennuskulujen lisäksi käyttö- sekä huoltokulut ja vähentää näistä rakennuksen lämmitysjärjestelmässä säästetyn energian kustannukset.

3. Yhteenveto

Diplomityötä varten tehtyjen kirjallisuuskatsauksen ja RF-mallinnusten perusteella temperierung-menetelmä ja sen erilaiset sovellukset ovat potentiaalisia vaihtoehtoja Suomessa käytettävien kosteusongelmien korjausmenetelmien rinnalle. Kirjallisuuslähteiden perusteella menetelmän käyttö tilojen lämmittämiseen vaatisi lisäselvityksiä etenkin Suomen ilmasto-oloihin sovellettuna.

Menetelmän käyttäminen kosteusongelmien korjausmenetelmänä perustuu rakenteiden kuivumiskyvyn parantamiseen lämpöenergian avulla. Lämmittämisen vaikutuksen suuruus rakenteiden kuivumiskykyyn riippuu erityisesti rakenteissa käytetyistä materiaaleista, kerrospaksuuksista ja rakenneratkaisuista sekä lämmönlähteiden sijoitteluista ja tehoista. Korjausmenetelmänä temperierungin vahvimpiin etuihin muihin menetelmiin verrattuna kuuluu sen yksinkertainen ja suhteellisen vähän rakenteita rikkova asennus vanhaankin kohteeseen. Haittapuolena tavanomaisiin korjauksiin nähden voidaan pitää menetelmän vaatimaa jatkuvaa energiankäyttöä ja ajoittaista huoltoa. Energiankäyttö kuitenkin kompensoituu ainakin osittain lämmityskaudella rakennuksen muissa lämmitysjärjestelmissä tapahtuvan säästön johdosta. Seinärakenteen kuivumisen hyödyiksi voidaan yleensä laskea muun muassa homeenkasvun riskin pieneneminen, seinän lämmöneristävyyden paraneminen ja materiaalien parempi säilyminen.

Rakennusten kosteusongelmien ehkäisyyn lisäksi temperierung-menetelmä soveltuu monien julkaisujen mukaan myös lämmitysjärjestelmäksi. Lämmitysjärjestelmän energiatehokkuudesta on kuitenkin saatavilla hyvinkin ristiriitaista tietoa. Kirjallisuuden perusteella energiatehokkuus riippuu suurelta osin ainakin temperierung-järjestelmän toteutuksesta, rakennuksen rakenneratkaisuista ja materiaaleista sekä lähtötilanteen kosteuspitoisuuksista. Menetelmän energiatehokkuutta on perusteltu erityisesti rakenteiden kuivumisen myötä parantuneella lämmöneristävyydellä sekä säteilyyn perustuvan lämmityksen nostamalla operatiivisella lämpötilalla. Oikein käytettynä seinärakenteiden lämmittäminen temperierung-menetelmällä voi olla toimiva ratkaisu lämmitysjärjestelmäksi, kosteudenhallintamenetelmäksi, korjausmenetelmäksi tai näiden yhdistelmäksi. Menetelmä kuitenkin vaatii vielä lisätutkimuksia ja erityisesti energiankäyttöä vertailevia tutkimuksia.

Lähdeluettelo

- [1] Großesmidt, H. 2004 Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering: The Tempered Building: Renovated Architecture - Comfortable Rooms - A "Giant Display Case". Wien, Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. s. 14-48
- [2] Kotterer, M., Großesmidt, H., Boody, F. P. ja Kippes, W. 2004. Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wien, Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9.
- [3] Bichlmair, S., Raffler, S, ja Kilian, R. 2014. The Temperierung heating systems as a retrofitting tool for the preventive conservation of historic museums buildings and exhibits. Energy and Buildings 95. München. s. 80-85
- [4] Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. ja Käkelä, P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio.
- [5] Krus, M ja Kilian, R. 2012. Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung - Feuchtetechnische und Wärmetechnische Aspekte. Berlin, Fourth German-Austrian IBPSA Conference.
- [6] Leipoldt, D. 2004. Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering: A Short Report on the Reduction of Heating Costs, Energy Use and Investment Costs through the use of Tempering for Heating Buildings: A Comparative Study in the Waldstraße Gymnasium in Hattingen Germany. Wien, Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. s. 209-214
- [7] Löther, T. 2014. Untersuchungen zur Temperierung historischer Gebäude. Hamburg, disserta Verlag

B2. Rakennusfysiikan laskentamenetelmät ja mittauslaitteet

Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla

Pauli Sekki, Lauri Korhonen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Betonirakenteiden riittävää kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinäarakenteet voivat kuitenkin koostua hyvin vesihöyrytiivistä rakennekerroksista, jotka rajoittavat betonisen kuorielementin kuivumista. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinäarakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota. Tässä tutkimuksessa määritettiin laboratoriomittauksia hyödyntäen laskentamalli kuorielementin kuivumisen mallinnukseen. Laskennallisessa tarkastelussa selvitettiin kuorielementin sisäpinnalle asennettavan vedeneristeen vaikutusta elementin kosteusjakaumaan ja kuivumiseen. Vaikka laskennan perusteella eri eristysmateriaalien kuivumisessa on merkittäviä eroja, ei sisäpinnan kosteus noussut missään laskentatapauksessa siten, että se aiheuttaisi rakenteeseen kosteusvaurioriskiä.

1. Johdanto

Betonirakenteiden riittävää kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinäarakenteet ovat kuitenkin usein varsin paksuja betonirakenteita ja käytössä on useita eri eristysmateriaaleja, jotka voivat parhaimmillaan olla hyvin vesihöyrytiivitä käytännössä estäen betonirakenteen kuivumisen ulospäin. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinäarakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota.

Tutkimus liittyy COMBI-hankkeeseen, jossa tutkittiin kokeellisesti kosteusmittauksin kuorielementtien kuivumista vakio-olosuhteissa. Lisäksi hankkeessa määritettiin kuorielementeissä käytettävän betonilaadun kosteusteknisiä ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa kuorielementtien tarkastelu tehdään hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla. Vaikka nuoren betonin kosteusolojen mallintamista on tutkittu lukuisissa julkaisuissa, laskentaan ei ole yleisesti hyväksyttyä ohjeistusta. Yleisen mallin kehittämiseksi ongelmana on betonin valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden laaja kirjo, jotka kaikki vaikuttavat osaltaan tuoreessa betonissa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin ja sitä kautta betonin kosteusominaisuuksiin. Toisaalta myös työtekniisillä tekijöillä on suuri merkitys betonin ominaisuuksiin unohtamatta betonin kypsymisolosuhteita. Käytännön ongelmana betonin kosteusilmiöiden mallintamisessa on riittämättömät tiedot käytetystä betonilaadusta.

Betonin kuivumisen arviointiin vakiolämpö ja -kosteusolosuhteissa on kehitetty malli, joka perustuu betonin diffusiviteettiin [1], ja jolle on annettu ohjeelliset betonin kuivumisnopeutta kuvaavat parametriarvot kansainvälisen asiantuntijaorganisaation fib (Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete) mallinormijulkaisussa [2]. Kyseisen mallin mukaisella tarkastelulla ei kuitenkaan saavutettu erityisen hyvää arviota betonin kuivumiselle verrattaessa sitä koekappaleiden kosteusmittauksiin [3]. Tässä tutkimuksessa laskennallisen tarkastelun materiaaliarvot määritettiin kirjallisuuden sekä laboratoriomittauksien perusteella. Laskentamallin toimivuus tutkitulla betonilaadulla varmistettiin käytännön

kosteusmittausten perusteella.

Laskennallisesti tarkastellaan, voiko kuorielementtien pinnoittaminen esimerkiksi vesihöyrytiivillä vedeneristeellä aiheuttaa kosteusvaurioita. Tulosten perusteella arvioidaan kuorielementin rajoitetun kuivumisen riskejä mahdollisten kosteusvaurioiden kannalta.

2. Laskentamalli

Betonin lämmön- ja kosteudensiirto sekä hydrataation vaikutus betonin kuivumiseen mallinnettiin lähteessä [4] kuvattujen yhtälöiden mukaisesti. Hydrataation vaikutus otetaan laskennassa huomioon lämmönlähteenä ja kosteusnieluna. Hydrataation etenemistä kuvataan hydrataatioasteella $\alpha(t_e)$. Muutoksena lähteessä [4] esitettyyn hydrataatioastetta (1) kuvaavaan yhtälöön, on tässä tutkimuksessa käytetty kokeellisesti määritettyä (2) betonin suhteellisen kosteuden vaikutuksen huomioivaa lisätermiä $\beta_{RH}(\phi)$. Hydrataatioaste on lisäksi riippuvainen lämpötilasta sekä betonilaadusta. Betonilaatua kuvaavat parametrit haettiin "trial and error" -menetelmällä tarkoittaen, että dynaamista kuivumiskokeiden simulointia tehtiin uudestaan ja uudestaan kokeilemalla eri parametrien arvoja, kunnes löydettiin arvot, jotka johtivat laskennan ja mittausten vertailussa tyydyttävään lopputulokseen, vrt taulukko 1.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \beta_{RH} \frac{\alpha_u \beta}{t_e} \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \exp\left[-\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$\beta \approx \left[1 + (7,5 - 7,5\phi)^4\right]^{-1} \quad (2)$$

- missä ϕ = betonin suhteellinen kosteus (-)
 α = hydrataatioaste (-)
 E = hydrataation aktivaatioenergia (J/mol)
 R = yleinen kaasuvakio, 8314,3 J/(kmol·K)
 T = lämpötila (K)
 T_r = vertailulämpötila (K)
 β_{RH} = suhteellisen kosteuden vaikutus hydrataatioon (-)
 α_u = lopullinen hydrataatioaste (< 1)
 β = hydrataation muotoparametri (-)
 t_e = ekvivalentti aika (s)
 τ = hydrataation aikaparametri (s)

Kosteudensiirron materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 1. Muut materiaaliominaisuudet on määritetty kirjallisuuden [5] sekä materiaalivalmistajien ilmoittamien tietojen perusteella.

Taulukko 1. Kosteudensiirron materiaaliparametrit ja niiden määrittäminen.

Materiaaliparametrit	Symboli	Määrittäminen
Vesihöyryn läpäisevyys	δ	Laboratoriokoe, vakioarvo
Kosteuspitoisuus	$w(\phi)$	Laboratoriokoe
Diffusiiviteetti nestemäiselle vedelle	D_w	Funktio [4] $C1$, α_0 , ϕ_c ja n
$D_{w,maks}$	$C1$	Laboratoriokoe
Suhde $D_{w,min}/D_{w,maks}$	α_0	Laboratoriokoe
ϕ keskellä muutosaluetta $D_{w,min}/D_{w,maks}$	ϕ_c	Trial and error -menetelmä
$D_{w,min}/D_{w,maks}$ muutoksen muotoparametri	n	Trial and error -menetelmä

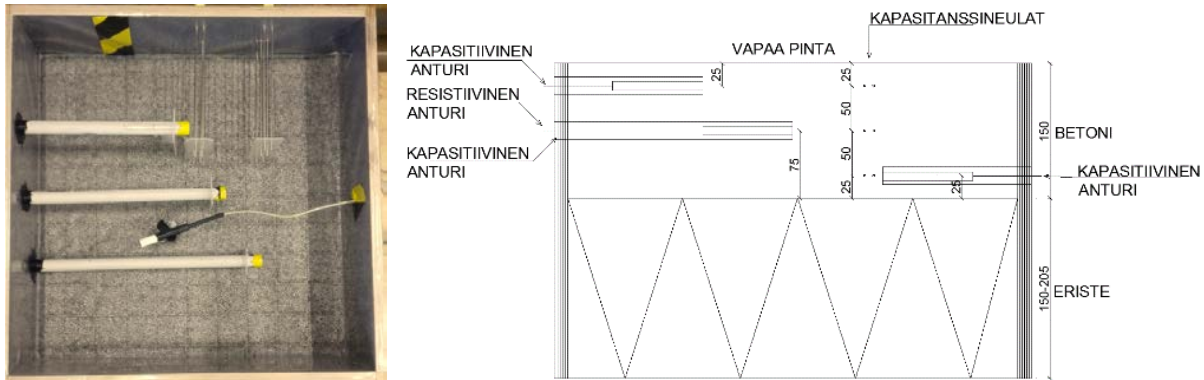
3. Kuorielementtirakenteiden kuivumistarkastelut

3.1 Tarkasteltavat rakenteet

Tutkimuksessa tarkasteltiin neljää kuorielementtirakennetta:

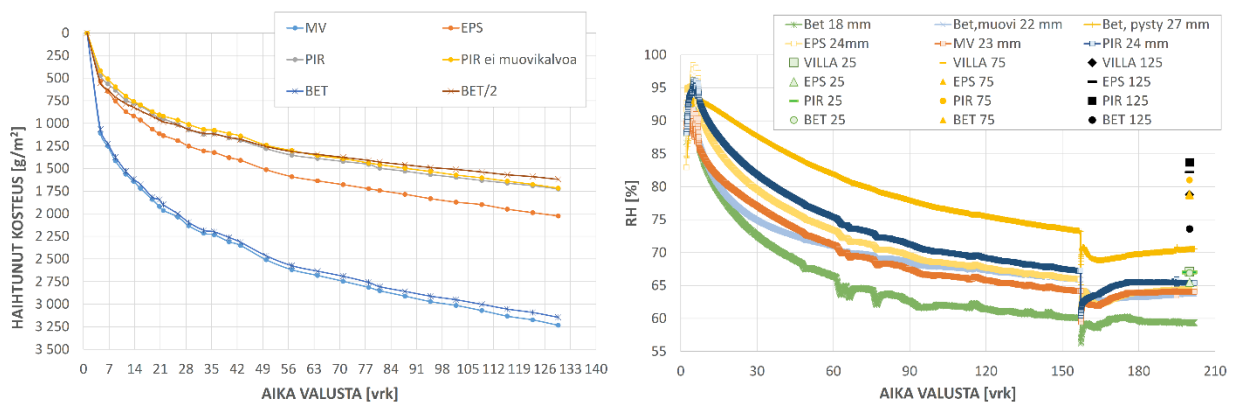
1. EPS: 150 mm betoni + EPS 60S 200mm (FF-EPS 60S), $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
2. MV/VILLA: 150 mm betoni + Min.villa 205 mm (Paroc Cortex One), $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
3. PIR: 150 mm betoni + PIR 150 mm (FF-PIR PLK, muovikalvo pinn.), $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
4. BET: 150 mm betoni

Eri rakennetyypeistä tehtiin koekappaleet, joista tehtiin kosteusmittauksia eri mittalaitteilla ja eri syvyyksiltä. Koekappaleen rakenne on esitetty kuvassa 1. Tässä tutkimuksessa verrokkina käytetään kapasitiivisilla kosteusantureilla tehtyjä mittauksia rakenteen pintaosasta sekä 200 vuorokauden kohdalla tehtyä kosteusjakauman määrittystä porareikämittauksella.



Kuva 1. Koekappaleet tehtiin sisäpuoleltaan muovikalvolla kosteuseristettyihin vanerilaatikoihin. Vasemmalla koekappale ylhäältä ja oikealla leikkauspiirustus.

Koekappaleiden kuivuskokeiden mittaustulokset on esitetty kuvassa 2. Punnituskoe ja suhteellisen kosteuden seuranta on tehty eri koesarjoista eri valuista, mutta samalla betonireseptillä. Pitkäaikaismittaukset olivat suunniteltu 25 mm, 75 mm ja 125 mm syvyyksille betonirakenteen vapaasta pinnasta. Kuvan 1 selitteissä on esitetty toteutuneet mittaussyvytydet. Kosteusjakauman mittaus tehtiin 200 vrk kohdalla porareikämittauksena [6].



Kuva 2. Vasemmalla 1. koesarjan punnitustulokset. Oikealla koekappaleiden pintarakenteen jatkuvatoimisten kosteusmittausten tulokset sekä 200 vrk kohdalla tehdyn kosteusjakauman määrittäminen hetkellisenä mittauksena. Lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta. Mineraalivilla on hyvin vesihöyryä läpäisevä ($\delta_{p,MV} = 190 \text{e-12 kg}/(\text{msPa})$) ja mittausten

perusteella mineraalivillalla eristetty koekappale kuivui yhtä nopeasti kuin eristämättömän koekappale. Muovieristeet ovat kohtalaisen vesihöyrytiivitä, joista EPS on kuitenkin hieman läpäisevämpi ($\delta_{p, EPS} = 5e-12 \text{ kg/(msPa)}$) kuin muovipinnoitettu PIR-eriste ($\delta_{p, PIR} = 4e-14 \text{ kg/(msPa)}$). Mittausten perusteella PIR-eristetty rakenne kuivuu hitaimmin, ja koekappaleesta haihtunut kosteus vastaa noin puolta kahteen suuntaan kuivuvan (Bet/2) kappaleen haihtuvasta kosteudesta. EPS-koekappaleen kuivuminen on vain hieman PIR-eristettyä nopeampaa.

3.2 Laskentamallin ja -parameterien määrittäminen

COMBI-hankkeessa on tutkittu betonin materiaaliominaisuuksia sekä rakennekoekappaleiden kuivumista laboratoriokeihin, joiden perusteella mallin laskenta- ja materiaali-parametrien määrittäminen tehtiin. Laskenta on tehty COMSOL Multiphysics -ohjelman versiolla 5.3.

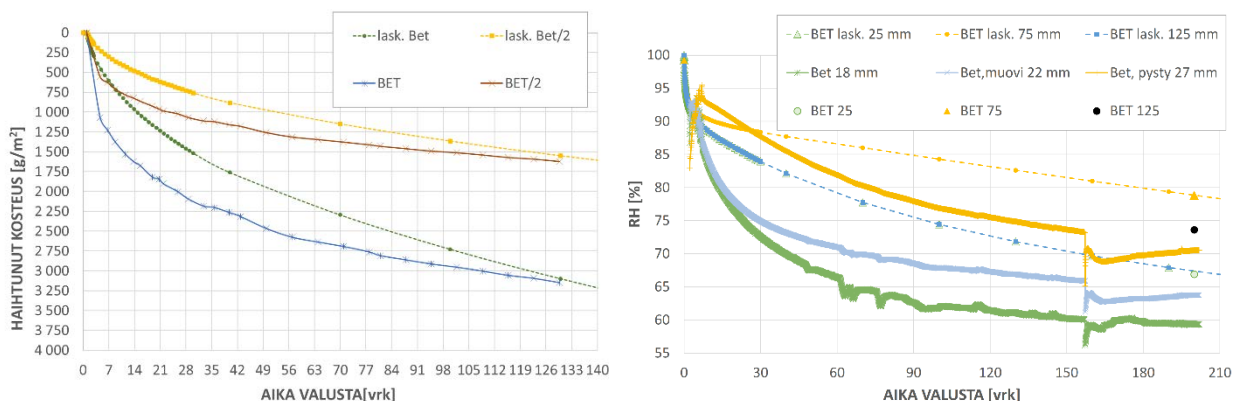
Ensimmäisessä vaiheessa määritettiin mitattavat materiaali-parametrit. Loput parametrit määritettiin trial error -menetelmällä eristämättömän kuorielementin mittausten perusteella, jonka jälkeen mallia testattiin eristettyjen koekappaleiden mittaksiin verrattuna.

3.3 Kuorielementtirakenteiden laskennallinen tarkastelu

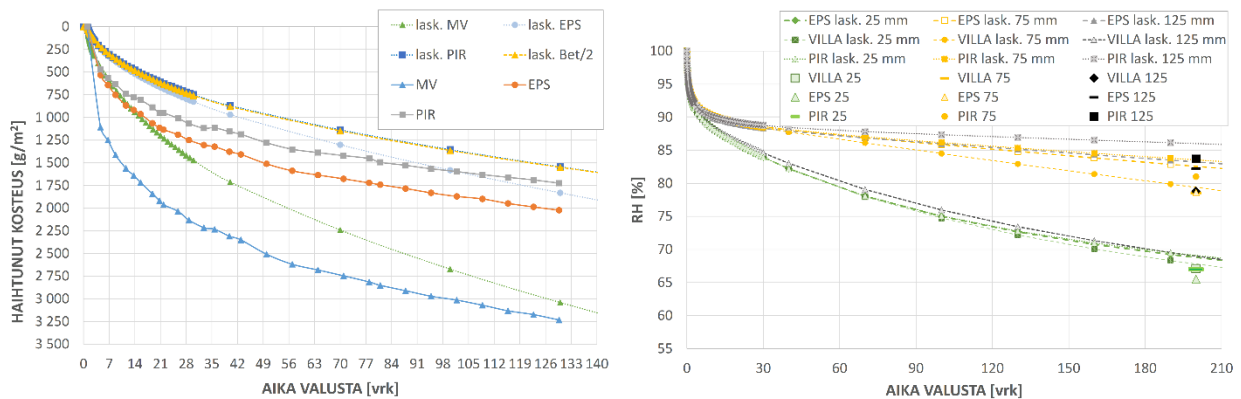
Tutkimuksessa tarkasteltiin laskennallisesti kuorielementtirakenteiden sisäpinnan vedeneristämisen vaikutusta kosteuskajauman muutokseen. Sisäpinnan lämpötilareunaehtona käytettiin vakiolämpötilaa $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ja muuttuvaa suhteellista kosteutta alkaen jälkihoidosta 100% ja päätyen käytönaikaiseen 40% (ks. Kuva 5). Ulkopuolisena reunaehtona käytettiin Comsol:n (ASHRAE 2013, Helsinki-Vantaan) keskimääräisiä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tietoja. Koska kuorielementin ulkopinta on tehokkaasti eristetty, ei ulkoilmareunaehdon käyttö aiheuta virhettä; kuorielementti on sisä- ja ulkopinnoilta tarkasteltuna tasalämpöinen $\sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Sisäpuolen lämpötila pidettiin tarkastelussa vakiona, jotta muutokset sisäpuolisessa kosteuskajaussa tulevat selkeästi esiin. Tarkastelun aloituspäivänä oli 1.6. Laskennassa sisäpintaan määritettiin 1 mm vedeneriste ($\delta_p = 3,2e-12 \text{ kg/(msPa)}$) 120 vuorokauden kohdalla. Vedeneristeen kerrospaksuus on valmistajan ohjeistukseen verrattuna kaksinkertainen.

4. Tulokset

Mittausten ja laskennan vertailut on esitetty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Laskentatulosten vertailut mittaustuloksiin. Vasemmalla kappaleesta haihtuneen kosteuden määrä pinta-alayksikköä kohden. Oikealla suhteellinen kosteus tarkastelusyvyyksillä. Hetkellisten mittausten selitteen lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta.

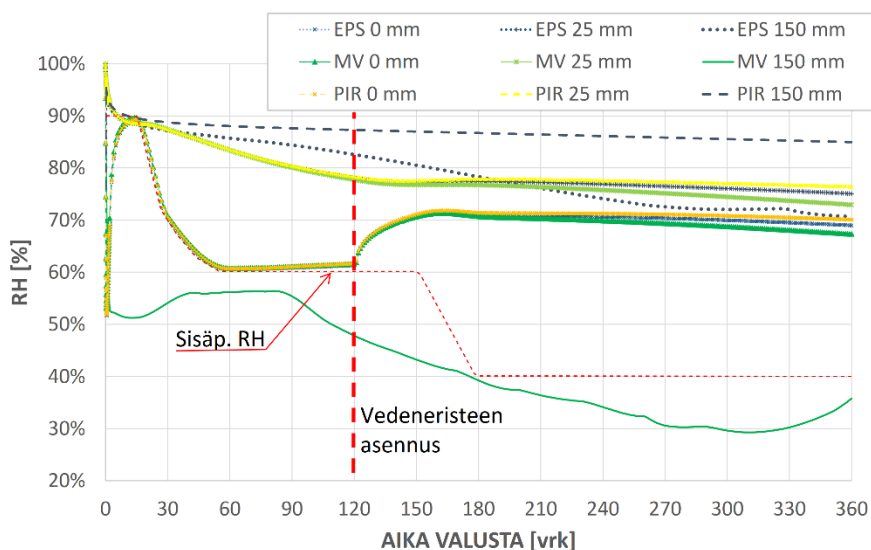


Kuva 4. Laskentatulosten vertailut mittaustuloksiin. Vasemmalla kappaleesta haihtuneen kosteuden määrä pinta-alayksikköä kohden. Oikealla suhteellisen kosteuden laskentatulosten vertailu kosteusjakauman mittaukseen 200 vuorokauden kohdalla. Hetkellisten mittausten selitteen lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta.

Kuvan 3 kosteusmittauksissa on esitetty kolmen eristämättömän koekappaleen mittaustulokset. Koekappale BET on valettu ja jälkihoidettu vastaavalla tavalla eristettyjen kanssa ilman jälkihoidtoa. BET, muovi -koekappaleen jälkihoidossa käytettiin muovia. BET, pysty -koekappale tehtiin pystyvaluna, jossa tarkastelupinta oli vanerimuottipintaa vasten. Koekappaleiden tarkat mittaussyvyydet on esitetty kuvassa. Mittaussyvyydet poikkesivat hieman tavoitesyvyydestä 25 mm, mikä vaikeuttaa hieman vertailua.

Laskentatulos vastaa tarkastelujakson molempien vertailumittausten lopputasoa hyvin. Erityisesti laskennan kosteus sekä kosteusjakauman mittaustulokset vastaavat hyvin toisiaan. Alkuvaiheen kuivumista ei onnistuttu kuitenkaan saamaan täysin mittauksia vastaavaksi eikä laskentakäyrien kulmakerroin vastaa mittauksia tarkastelun loppuvaiheessa. Tästä syystä tarkasteluja ei tehty pidemmälle kuin vuoden tarkastelujaksolle.

Kuvassa 5 on esitetty kuorielementin sisäpinnan vedeneristyksen vaikutus rakenteen kuivumiseen.



Kuva 5. Kuorielementin suhteelliset kosteudet laskentatapauksissa eri syvyyksillä. 0 mm on betonin sisäpinta vedeneristeen alla ja 150 mm kuorielementin ulkopinnassa betonin ja eristeen rajapinnassa. Vedeneristeen asennus 120 vuorokauden kohdalla. Laskennan aloituspäivä 1.6.

Tulosten perusteella vedeneristeen asennuksen jälkeen betonirakenteen sisäpinnan kosteus nousee tarkastelutapauksissa noin 10 prosenttiyksikköä. Koska kaikissa tapauksissa kosteus 25 mm syvyydellä on lähes sama, ei kosteuden nousussakaan ole merkittäviä eroja eri eristeiden välillä. Koska PIR-eristetty rakenne kuivuu ulospäin hitaimmin, on kosteus myös sisäpinnassa korkein tarkastelujakson lopussa ollen tarkastelujakson lopussa noin 3 RH-yksikköä korkeampi verrattuna mineraalivillaeristettyyn. Eroa EPS-eristettyyn rakenteeseen on kuitenkin sisäpinnassa vain hyvin vähän. Tarkastelutapauksessa vedeneristys ei kuitenkaan aiheuta missään tapauksessa sellaista kosteuden nousua pintarakenteeseen, mikä aiheuttaisi rakenteen vaurioitumisriskiä.

Tarkasteltaessa kuorielementin ja eristeen rajapintaa voidaan todeta, että PIR-eristetty rakenne kuivuu heikoiten. Suhteellinen kosteus tarkastelujakson lopussa on noin 85 %. EPS eristeellä kosteus lopussa on 70 % ja mineraalivillan tapauksessa betonirakenteen ulkopinnan kosteus seuraa ulkopuolista olosuhdetta. Laskennan lopussa PIR-eristetyn kuorielementin keskimääräinen kosteuspitoisuus on noin 113 kg/m³, mikä vastaa noin 80 % keskimääräistä suhteellista kosteutta. Vastaavasti keskimääräinen kosteuspitoisuus EPS-eristetyn rakenteen tapauksessa on noin 107 kg/m³ (RH 75 %) ja mineraalivillaeristetyn 93 kg/m³ (RH 65 %).

Tarkastelussa vedeneristysten asennus on lokakuun alussa, joten ulkoilman lämpötila on siitä eteenpäin selkeästi sisäilman lämpötilaa matalampi. Betonirakenteen yli ei ole merkittävä lämpötilaeroa, koska rakenteet ovat tehokkaasti lämmöneristettyjä. Sen sijaan eristeen yli on suuri lämpötilaero, jolloin kuivuminen vesihöyryä hyvin läpäisevän lämmöneristeen yli on tehokasta, kuten mineraalivillan tapauksessa (vertaa kuva 4). Erityisen vesihöyrytiivillä eristeellä, kuten muovipinnoitetulla PIR-eristeellä, kuorielementin kosteus siirtyy kohti ulkopintaa ja ranteen kuivuminen tapahtuu hyvin hitaasti. Koska laskenta on tehty keskimääräisillä ulkoilman olosuhdetiedoilla, ei sateen vaikutus näy tuloksissa. Tarkempi tulos saataisiin tekemällä laskenta tuntitasolla käyttäen tuntitason olosuhdetietoja. Tällöin edellä kuvatut erot rakenteiden kuivumisessa saattavat hieman tasoittua, koska mineraalivilla eristetty rakenne saa kosteutta myös ulkoilmasta.

Tulosten perusteella kuorielementtirakenteiden sisäpinnan pinnoittaminen tiiviilläkin pinnoitteella tms. materiaalikerroksella ei aiheuta merkittävää riskiä pinnoitteen vaurioitumisen kannalta. Mikäli kuorielementin sisäpuolelle asennetaan eristekerroksia tai lämpöä eristäviä rakenneosia, voi sisäpuolinen lämpöä eristävä rakenne betonin sisäpinnan lämpötilan laskiessa nostaa suhteellisen kosteuden haitallisen korkeaksi. Erityisen vesihöyrytiivitä eristeitä käytettäessä suositellaan tässä tapauksessa varmistamaan, että betonikuori kuivuu riittävästi ennen sisäpuolisten rakenteiden asennusta.

5. Yhteenveto

Tutkimuksessa määritettiin laboratoriomittauksia hyödyntäen laskentamalli kuorielementin kuivumisen mallinnukseen. Mittausten perusteella kuorielementtirakenteiden kuivumisessa on valitusta eristeestä riippuen suuria eroja. Mittausten perusteella laboratorio-olosuhteissa mineraalivillaeristetty kuorielementti kuivuu huomattavasti nopeammin kuin EPS- tai PIR-eristetyt rakenteet. Laskennallisessa tarkastelussa selvitettiin kuorielementin sisäpinnalle asennettavan vedeneristeen vaikutusta elementin kosteusjakaumaan ja kuivumiseen. Vaikka laskennan perusteella eri eristysmateriaalien kuivumisessa on merkittäviä eroja, ei sisäpinnan kosteus noussut missään laskentatapauksessa siten, että se aiheuttaisi rakenteeseen kosteusvaurioriskiä. Laskentatulokset saatiin kohtalaisen hyvin vastaamaan vakio-olosuhteissa tehtyjä mittauksia. Mallin toimivuutta tulee vielä tarkastella muuttuvissa lämpötila- ja

kosteusolosuhteissa. Lisäksi tulee pyrkiä selvittämään, miten kuivumisen alkuvaiheen laskentatulokset saadaan vastaamaan paremmin käytäntöä.

Lähdeluettelo

- [1] Bazant Z.P, Najjar L.J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materiaux et construction* vol. 5. No 25 – 1972.
- [2] fib Bulletin 65: Model Code 2010 - Final draft, Volume 1. Fib 2012
- [3] Sekki P, Viljanen K. Betonirakenteiden kosteuskäyttäytymisen arviointi mallintamalla *Rakennusfysiikka 2015*. Juvenes Print, Suomen Yliopistopaino 2015.
- [4] Sekki, P. ja Karvinen, T. 2017. Numerical simulation and measurements of drying of Finnish concrete grades. *Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics*. Trondheim, Norway, 11-14 June 2017.
- [5] RIL 255-1 *Rakennusfysiikka I, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset*. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Tammerprint Oy 2014.
- [6] *Rakennustieto 2010. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus*. RT 14-10984.

Betonilaatan ja sen kuivatusputkiston toiminnan numeerinen simulointi

Timo Karvinen¹ ja Pauli Sekki²

¹COMSOL Oy

²Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Betonin kuivuminen voi betonilaadusta ja rakenteesta riippuen olla hyvin hidasta. On ilmiselvää tarve saada betonilaatat kuivattua nopeammin. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä betonilaatan sisään asennettua kuivatusputkistoa. Tutkimuksessa on selvitetty numeerisen laskennan avulla ilmavirtaukseen perustuvan kuivatusputkiston toimintaa. Tulokset osoittavat miten kuivatusputkien halkaisija, virtausnopeus ja kuivausilman lämpötila sekä putkikonfiguraatio vaikuttavat laatan kuivumiseen. Tulosten perusteella kuivatusputkiston käyttö nopeuttaa betonilaatan kuivumista ja mahdollistaa ajansäästön rakentamisvaiheessa.

1. Johdanto

Betonin kuivuminen voi betonilaadusta ja rakenteesta riippuen olla hyvin hidasta. Jos betonilaatan valamisen jälkeen laatta päällystetään ennen kuin se on ehtinyt kuivua riittävästi, on seurauksena mahdollisesti käytön aikana ilmenevä home- ja sisäilmaongelma. Myös kosteusvauriokohteissa kuivatus kestää pitkään. On ilmiselvää tarve saada betonilaatat kuivattua nopeammin.

Kuivumista voidaan nopeuttaa asentamalla laatan sisään kuivatusputkisto, jossa kiertää lämmintä ja kuivaa ilmaa suurella nopeudella. Tavanomaisessa rakenteessa kosteus poistuu betonista haihtumalla vapaiden pintojen kautta ympäristöön. Käytettäessä kuivatusputkistoa kosteudella on toinenkin poistumisreitti ja betonin suhteellinen kosteus saadaan nopeammin tasolle, joka on vaatimuksena seuraavan työvaiheen aloittamiselle.

Tutkimuksessa on selvitetty elementtimenetelmään (FEM) perustuvalla simulointiohjelmalla miten eri geometriat ja kuivatusjärjestelmän parametrit vaikuttavat betonilaatan kuivumiseen. Kuivatusputkistossa on laskettu virtauskenttä käyttäen Reynolds-keskiarvotettua turbulenssimallia. Laatan solidi-alueella ratkaistaan lämmön- ja kosteudensiirtoa hallitsevat yhtälöt. Kosteus siirtyy betonin-putki -rajapinnan yli ja kulkeutuu putkessa diffuusiolla ja konvektiolla, jossa myös turbulenti sekoittuminen on otettu huomioon.

Huokoisen aineen kuivumista ja virtausta on tutkittu laajasti puupohjaisten materiaalien yhteydessä, esim. [1], mutta betonin vastaavanlaisesta simuloinnista kirjoittajilla ei ole tietoja. Menetelmää on sovellettu menestyksekkäästi mm. kipsilevyjen kuivumista koskevassa tutkimuksessa [2], jossa tekijät implementoivat itse lämmönsiirtoa, kuivumista ja virtausta hallitsevat yhtälöt laskentaohjelmaan.

Simuloimalla voidaan tutkia pienessä ajassa suuri määrä eri vaihtoehtoja ja aika- ja kustannussäästö on merkittävä verrattuna kokeelliseen työhön, jota myöskin tarvitaan materiaaliominaisuuksien määrittämiseen sekä laskentamallien validoimiseen. Analyysiin on helposti lisättävissä laattojen päällystäminen tai minkälainen tahansa muutos reunaehdoissa ajan suhteen, mitä ei kuitenkaan ole vielä tehty tässä tutkimuksessa.

Artikkelissa on esitetty teoreettinen tutkimus lämpötilan, virtausnopeuden, putken tilavuuden ja laatan suhteesta sekä eri konfiguraatioiden merkityksestä laatan kuivumiseen.

2. Lämmön ja kosteuden siirtyminen betonissa ja virtaus ilmassa

Tässä luvussa esitetään kosteuden- ja lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt ja reunaehdot sekä käsitellään simuloinnissa tarvittavia reunaehtoja ja materiaaliominaisuuksia. Laskenta on tehty COMSOL Multiphysics –simulointiohjelman versiolla 5.3

2.1 Kosteuden- ja lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt

Kytkeytyä kosteuden- ja lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt huokoisessa aineessa ovat energia- ja massatase [3]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(k + h_v \delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} \right) \nabla T + h_v \delta_p p_{sat} \nabla \varphi \right] \quad (1)$$

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} \nabla T + (D_\varphi + \delta_p p_{sat}) \nabla \varphi \right] \quad (2)$$

Lisäksi kosteudensiirtoa ilmassa hallitsee yhtälö

$$\frac{\partial (M_v \varphi c_{sat})}{\partial t} + \nabla \cdot [-D \nabla (M_v \varphi c_{sat})] + \mathbf{u} \cdot \nabla (M_v \varphi c_{sat}) = G \quad (3)$$

missä	T	= lämpötila (K)
	t	= aika (s)
	φ	= suhteellinen kosteus (-)
	ρ	= tiheys (kg/m ³)
	C_p	= ominaislämpö (J/kg·K)
	k	= lämmönjohtavuus (W/m·K)
	h_v	= veden höyrystymisen latentti lämpö, 2260 J/kg
	δ_p	= vesihöyryn permeabiliteetti (kg/m·s·Pa)
	p_{sat}	= kylläisen vesihöyryn osapaine (Pa)
	D_φ	= kosteusdiffusiviteetti (kg/m·s)
	ξ	= kosteuskapasiteetti, $dw/d\varphi$ (kg/m ³)
	w	= kosteuspitoisuus (kg/m ³)
	M_v	= veden moolimassa (kg/mol)
	c_{sat}	= kylläisen vesihöyryn konsentraatio (mol/m ³)
	D	= vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa (m ² /s)
	\mathbf{u}	= virtausnopeusvektori (m/s)
	G	= kosteuslähde (kg/m ³ ·s)

Tässä tutkimuksessa hydrataatio eli veden kemiallinen sitoutuminen kuivumisen alkuvaiheessa on jätetty huomioimatta. Hydrataation sisällyttäminen analyysiin on esitetty mm. viitteessä [4].

2.2 Virtausta hallitsevat yhtälöt

Virtausta hallitsevat Navier-Stokesin yhtälöt, jotka ovat yleisessä muodossa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F} \quad (5)$$

missä p = paine (Pa)
 \mathbf{I} = yksikkötensori (-)
 $\boldsymbol{\tau}$ = kitkajännitystensori (Pa)
 \mathbf{F} = tilavuusvoimavektori (N/m³)

Lisäksi kun virtauksessa tapahtuu lämmönsiirtoa, on ratkaistava energiayhtälö

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + Q \quad (6)$$

missä \mathbf{q} = lämpövirtavektori (W/m²)
 Q = lämmönlähde (W/m³)

Turbulentin virtauksen ollessa kyseessä yhtälöiden (4) ja (5) numeerinen ratkaisu ei ole mahdollista käytännön geometrioissa suuren laskentakustannuksen vuoksi. Yhtälöt Reynolds-aikakeskiarvotetaan ja turbulenssia kuvaavat termit mallinnetaan turbulenssimallilla, joissa suureina ovat tyypillisesti turbulenssin kineettinen energia ja dissipaatio. Tässä tutkimuksessa on käytetty SST turbulenssimallia, joka laskee virtauksen tarkasti seinälle asti. Tämä on vaatimuksena, kun halutaan mallintaa tarkasti kosteuden siirtymistä fluidi-solidi -rajapinnassa. Suorassa putkessa ja muuttumattomissa olosuhteissa kosteudensiirto huokoisesta aineesta ilmaan voitaisiin laskea puoli-analyttisillä korrelaatioilla kohtuullisen tarkasti, mutta kolmiulotteisissa geometrioissa ja ajan suhteen muuttuvilla reunaehdoilla ja materiaaliominaisuuksilla numeerinen ratkaisu on ainoa vaihtoehto. Turbulentti sekoittuminen otetaan huomioon ilmatilavuudessa lisäämällä diffusiviteettiin D pyörreviskositeetin aiheuttama kontribuutio.

2.3 Reunaehdot

Putken sisäänvirtausreunalla määritettiin virtausnopeus ja ulosvirtausreunalla oli painereunaehto (ylipaine nolla). Lämpötila annettiin sisäänvirtausreunalla ja ulosvirtausreunalla oli outflow-ehto eli lämpötilagradientti normaalin suunnassa nolla. Suhteelliselle kosteudelle annettiin sisäänvirtausreunalla vakioarvo, mikä oli useimmissa tapauksissa hyvin kuiva ilma RH = 1 % ja ulosvirtausreunalla lämpötilaehtoa vastaava outflow. Mittauksissa kuivatusilman suhteellista kosteutta on hankala saada säädettyä tuohon lukuarvoon ja käytännössä ilma olisi joko lämmitettyä sisä- tai ulkoilmaa. Betonilaatta oli ylä- ja alapinnoiltaan lämpö- ja kosteuseristetty lukuun ottamatta tapauksia, joissa tarkasteltiin laatan luonnollista kuivumista ilman kuivatusputkistoa. Tällöin tarvitaan reunaehtoihin ympäristön lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä konvektiiviset lämmön- ja kosteudensiirtokertoimet. Kuivatusputkissa ilman ja betonin rajapinnassa lämpö- ja kosteusvuot ovat yhtä suuret kumpaankin suuntaan, minkä simulointiohjelma huolehtii automaattisesti. Lisäksi oletettiin, että betonin ja ilman välillä ei ole vastusta, eli ilman kanava on suoraan betonin sisällä ilman minkäänlaista putken seinämää.

Alkutilanteessa sekä betonin että ilman lämpötila oli 20 °C ja suhteellinen kosteus 97 %.

2.4 Materiaaliominaisuudet

Betonin materiaaliominaisuuksina on käytetty kirjallisuudesta löydettyjä arvoja, jossa kaikki kosteusominaisuudet ovat suhteellisen kosteuden funktioita [3]. Tiedossa ei ole mikä betonityyppi on kyseessä. Betonilaadulla on merkittävä vaikutus kuivumisnopeuteen [4]. Ilmalle on käytetty COMSOL Multiphysicsin materiaalikirjaston ominaisuuksia.

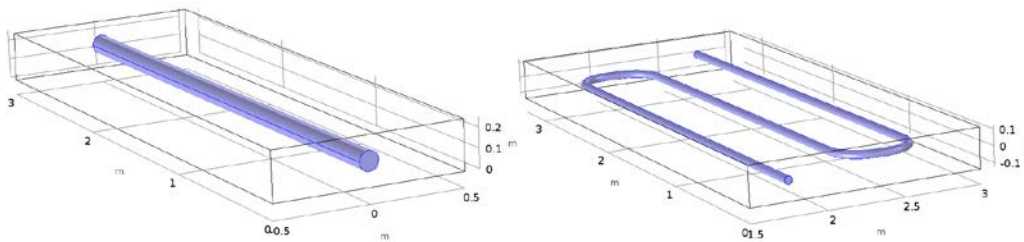
3. Simulointitapaukset

Laskenta tehtiin siten, että ensin ratkaistiin stationääri virtausnopeusjakauma putkistossa. Seuraavaksi laskettiin ajasta riippuvana lämmön- ja kosteudensiirto alkulämpötilasta ja –kosteudesta noin vuoden ajan eteenpäin käyttäen aiemmin laskettua stationääriä virtauskenttää. Tätä lähestymistapaa voidaan käyttää, koska lämpötila- ja kosteusprofiilin muutokset vaikuttavat hyvin heikosti virtauskenttään, ja lisäksi saadaan merkittävä säästö laskentakustannuksessa, koska virtausyhtälöt ovat hankalampia ratkaista kuin lämmön- ja kosteudensiirron yhtälöt.

Tutkimuksessa tarkasteltiin betonilaatan kuivumista varioimalla eri parametreja. Näitä olivat lämpötila putkistossa, virtausnopeus, putken tilavuuden suhde betonilaatan tilavuuteen sekä erilaiset putkikonfiguraatiot. Simuloidut tapaukset on listattu taulukossa 1. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta eri geometriaa. Ensimmäisenä tapauksena oli suora putki laatassa, jonka dimensiot olivat 1 x 3 x 0,25 m³, ja toisena tapauksena kaksi 180 asteen mutkaa laatassa, jonka dimensiot olivat 3 x 3 x 0,25 m³ ja putken halkaisija 0,05 m, kuva 1. Osassa laskentatapauksista kuivuminen oli mahdollista ainoastaan putkeen ja osassa myös yläpinnalta ympäristöön.

Taulukko 1. Simulointitapaukset.

Geometria 1	Virtausnopeus V , lämpötila T	
$D = 50 \text{ mm}$	$V = 5 \text{ m/s}$	$T = 20, 40, 60 \text{ °C}$
$D = 50 \text{ mm}$	$T = 40 \text{ °C}$	$V = 1, 5, 10 \text{ m/s}$
$D = 100 \text{ mm}$	$T = 40 \text{ °C}$	$V = 0.1, 1, 5, 10, 20 \text{ m/s}$
Geometria 2		
	$V = 5 \text{ m/s}$	$T = 20, 40, 60 \text{ °C}$
	$T = 40 \text{ °C}$	$V = 0.1, 1, 5 \text{ m/s}$

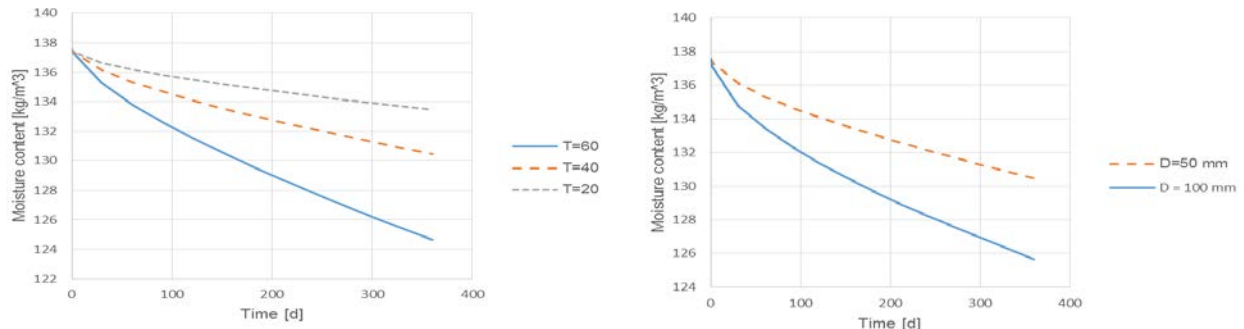


Kuva 1. Simulointitapaukset. Geometria 1 vasemmalla, geometria 2 oikealla.

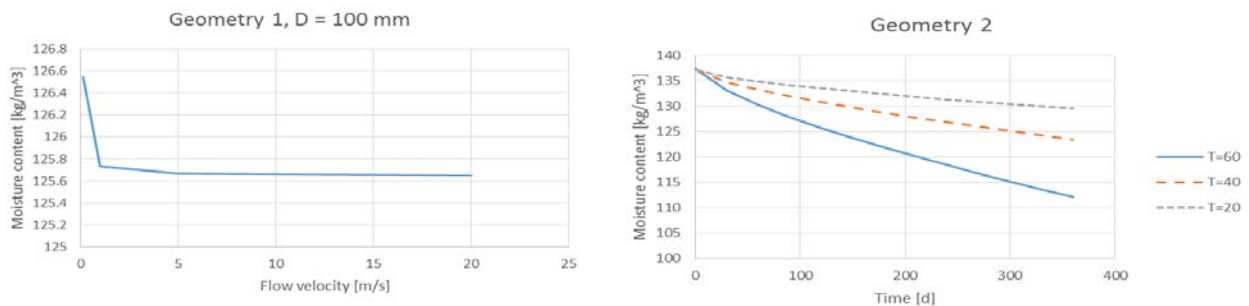
Geometrian 1 putkihalkaisijoilla 50 ja 100 mm putken ja betonin tilavuuden suhteet ovat 0,0077 ja 0,032. Geometrian 2 tapauksessa suhde on 0,015. Putkiston on oletettu olevan rakenteeltaan sellainen, että betonin sisällä on onntto ilmatila eikä putkien seinämiä oteta huomioon lämmön- ja kosteudensiirron laskennassa. Todellisuudessa näistä aiheutuisi pieni lämpö- ja kosteusvastus ja ne voitaisiin tarvittaessa sisällyttää laskentamalliin.

4. Tulokset

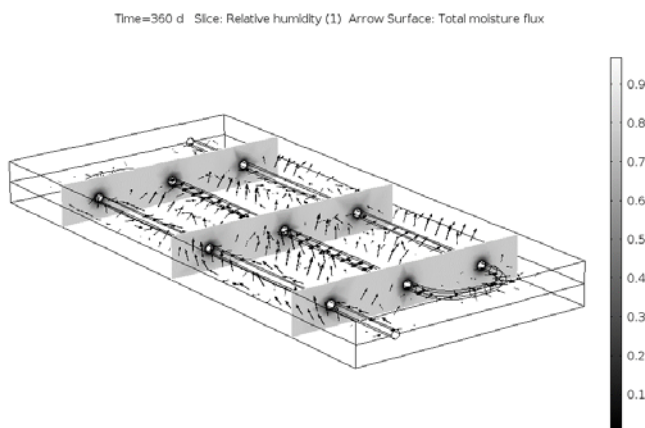
Kuvissa 2–5 on esitetty simulointitulokset. Perustapauksena on ilman virtausnopeus 5 m/s ja lämpötila 40 °C ja kosteus siirtyy betonilaatasta vain putkistoon.



Kuva 2. Keskimääräinen kosteuspitoisuus geometriassa 1. Vasemmalla $D = 50$ mm putki ja eri kuivausilman lämpötilat. Oikealla eri putkihalkaisijoiden vaikutus kuivausilman lämpötilassa 40 °C ja virtausnopeudella 5 m/s.



Kuva 3. Vasemmalla keskimääräinen kosteuspitoisuus geometriassa 1 ja virtausnopeuden vaikutus kuivumiseen 360 d kuluttua. Oikealla kuivausilman lämpötilan vaikutus ajan funktiona geometriassa 2.



Kuva 4. Suhteellisen kosteuden jakauma sekä kosteusvuovektorit geometriassa 2 360 d kuluttua.

Kuvan 2 perusteella voidaan todeta, että korkea kuivausilman lämpötila vaikuttaa merkittävästi kuivumisnopeuteen. Samoin, kun putken halkaisijan koko kaksinkertaistuu, kuivuminen nopeutuu huomattavasti. Tällöin myös tilavuusvirta on nelinkertainen. Kuvassa 3 on esitetty virtausnopeuden (tai tilavuusvirran) vaikutus kuivumiseen. Yllättäen saman kokoisessa putkessa tilavuusvirran kasvattaminen ei tietyn arvon jälkeen juurikaan vaikuta kuivumisnopeuteen. Suhteellisen kosteuden jakauma sekä kosteusvuovektorit 360 d kuluttua on esitetty kuvassa 4.

Kosteusvuovektorit osoittavat kohti putken seinämää, mikä osoittaa kosteuden siirtyvän kohti kuivatusputkia. Tarkasteluissa kappaleet on eristetty betonilaatan ulkopinnasta, jotta vain virtauksen aiheuttama kuivatus saadaan selville. Lämpötilan nousu laatussa tosin vaikuttaa myös kuivumiseen.

Tulosten perusteella kuivatusnopeus on maltillinen, koska kosteutta poistuu käytetyillä parametreilla tapauksesta riippuen 5–30 kg/m³. Vertailun vuoksi, kun geometria 1 D = 50 mm kuivuu yläpinnaltaan ilman putkikuivausta ympäristöön, joka on ominaisuuksiltaan T = 20 °C ja RH = 50 %, 360 d kuluttua keskimääräinen suhteellinen kosteus on 92,7 % ja kosteuspitoisuus 124,5 kg/m³ (vrt. kuva 2.) Geometrian 2 tapauksessa lukuarvot ovat 93,1 % ja 124,9 kg/m³. Lisäksi laskettiin tapaukset, kun sekä putkikuivaus että luonnollinen kuivaus yläpinnalta olivat mukana. Tällöin kosteuspitoisuus ja suhteellinen kosteus 360 d kuluttua olivat putkelle D = 50 mm 105,8 kg/m³ ja 86,1 % ja putkelle D = 100 mm 100,9 kg/m³ ja 83,3 %. Kuivumisnopeus on siis merkittävästi suurempi, kun myös luonnollinen kuivuminen on mahdollista verrattuna pelkkään putkikuivatukseseen. Vaadittavat laskentaresurssit ja -kustannukset artikkelissa esitetyille simuloinneille olivat seuraavat. Työasemalla, jossa oli prosessori i7-4820K 3.70 GHz, laskennan seinäkelloaika oli 30–60 min geometriasta ja mallin symmetriasta riippuen. Ratkaistavia vapausasteita oli 5-10·10⁴ ja muistin käyttö maksimissaan 3 GB.

5. Yhteenveto

Tutkimuksessa on tehty teoreettinen tarkastelu virtausnopeuden, lämpötilan, putkikoon ja konfiguraation vaikutuksesta betonin kuivumiseen käytettäessä laatan sisään asennettua kuivatusputkistoa. Virtausta sekä lämmön- ja kosteudensiirtoa hallitsevat yhtälöt ratkaistiin simulointiohjelmistolla. Laskentatulokset osoittavat miten eri parametrit vaikuttavat laatan kuivumisnopeuteen. Kuivatusilman lämpötilan merkitys on suurempi kuin virtaavan ilman nopeus tai tilavuusvirta kuivumisnopeuteen. Toisaalta suurempi putken vaipan pinta-ala nopeuttaa kuivumista. Tutkimus antaa hyvät jatkamahdollisuudet suunnitella optimaaliset parametrit kuivatettavaan kohteeseen. Laskentamalli vaatii vielä validointia mittaustuloksiin, kunhan tiedetään tarkat parametrit, mitat ja käytetty betonilaatu, jonka materiaaliominaisuuksilla on merkittävä vaikutus kuivumiseen.

Lähdeluettelo

- [1] Sun, Z.F., Carrington, C.G., Anderson, J.A. ja Sun, Q. 2004. Air Flow Patterns in Dehumidifier Wood Drying Kilns. Trans IChemE, Part A, October 2004, Chemical Engineering Research and Design, 82(A10): pp. 1344-1352.
- [2] Nespoli, L., Bianchi Janetti, M. ja Ochs, F. 2013. Comparing Different Approaches for Moisture Transfer inside Constructions with Air Gaps. Proceeding of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam.
- [3] Hagentoft, C.-E., Sasic Kalagasidis, A., Adl-Zarrabi, B., Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., Adan, O., Brocken, H., Kumaran, K. ja Djebbar, R. 2004. Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components. Benchmarks for One-dimensional Cases. Journal of Thermal Envelope and Building Science, April 2004; vol. 27, 4: pp. 327-352.
- [4] Sekki, P. ja Karvinen, T. 2017. Numerical simulation and measurements of drying of Finnish concrete grades. Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics. Trondheim, Norway, 11-14 June 2017.

Alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliset FEM-simuloinnit

Juha Salo, Petteri Huttunen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliseen simulointiin liittyvää tutkimusta. Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisen mallinnuksen avulla poistoilmanvaihdolla alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ryömintätilan tiiviyyden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteiden hallittavuuteen kohtuullisilla poistoilmamäärillä. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin maata vasten olevien erilaisten ilmatiivistysratkaisuiden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Työssä annettiin myös suosituksia ryömintätilan rakenneratkaisuksi sekä ilmanvaihtuvuuksien arvoiksi hallitun ilmanvaihdon näkökulmasta. Ryömintätilan olosuhteita tarkasteltiin 2 vuoden ajan muuttuvilla, homeen kasvun kannalta kriittisillä ulkoilman olosuhteilla.

1. Johdanto

Tässä työssä simuloitiin kolmiulotteisen poistoilmanvaihdolla alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ajasta riippuvaa lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa toisiinsa kytketyistä eriulotteisista osamalleista koostuvalla kokonaismallilla, koska täysin massiivinen yhdistetty 3D-mallinnus ei ole ainakaan ilman suurteholaskentaa mahdollista. Tarkasteltava kokonaismalli jaettiin rakenneosien perusteella kolmeen eri osamalliin: ryömintätilaan, alapohjarakenteeseen sekä rakennuksen maa- ja perustusrakenteisiin. Ryömintätila mallinnettiin 0-ulotteisena (0D) pisteenä. Alapohjarakenne mallinnettiin 1-ulotteisena (1D) janana. Maa- ja perustusrakenteet mallinnettiin 2-ulotteisena (2D) tasona. Mallinnus tehtiin monifysiikkamallinnusohjelma COMSOL Multiphysicsillä. Tutkimuksessa käytetyt rakennusmateriaalit ja niiden ominaisuudet pyrittiin valitsemaan vastaamaan Suomessa yleisesti käytettyjen rakennusmateriaalien ominaisuuksia mahdollisimman hyvin. Myös sääolosuhteet valittiin Suomen ilmaston mukaiseksi. Saatuja tuloksia arvioitiin Suomalaisen homemallin ja ilmavirtojen suuruuden perusteella.

Simulointien tuloksina saatiin ryömintätiloille ajasta riippuvia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja, joiden perusteella Suomalaista homemallia käyttäen laskettiin ryömintätiloille homeen kasvun riskiä kuvaavia homeindeksin arvoja. Tarkasteltavien rakenneratkaisuiden ja ilmanvaihtuvuuksien toimivuuden arviointikriteerinä homeindeksin lisäksi oli poistoilmavirran suuruuden kohtuullisuus. Artikkelin tarkoituksena on ensisijaisesti esitellä miten alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan mallinnus toteutettiin COMSOL Multiphysicsillä. Lisätietoa tehdystä tutkimuksesta on saatavilla diplomityöstä [1].

2. Laskentamallin esittely

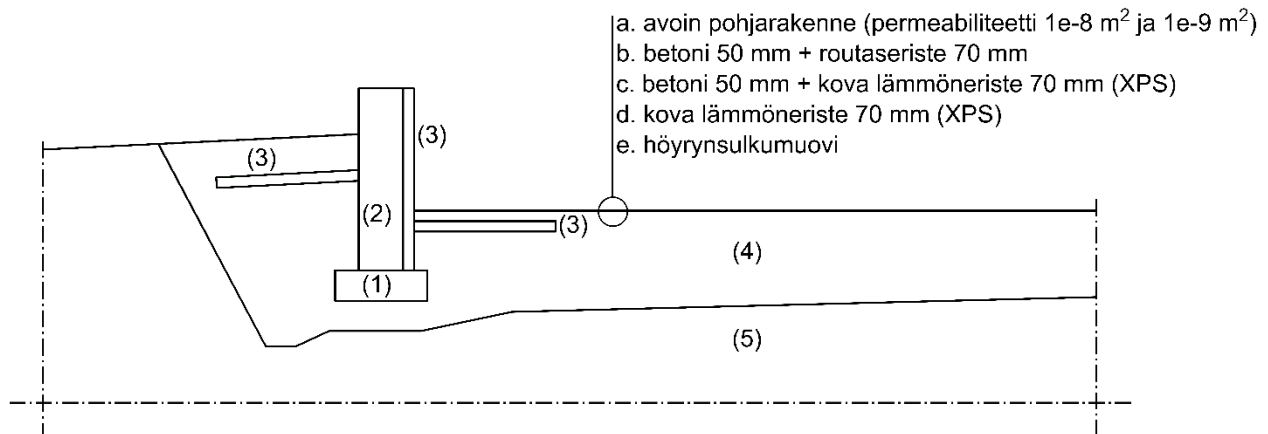
2.1 Tutkitut rakenteet

Työssä tutkittiin suorakaiteen muotoista rakennusta, jonka pohjapinta-ala on $A = 129 \text{ m}^2$ (14,5 m x 8,9 m). Ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan korkeus oli määräysten mukainen $y = 0,8 \text{ m}$ [2].

Ryömintätilan tilavuudeksi V_{CS} (m^3) saatiin näin ollen $V_{CS} = A \cdot y = 104 \text{ m}^3$. Kokonaismalli oli kooltaan 10 metriä syvä ja 12,8 metriä leveä.

Ryömintätilan tuuletus tapahtui perusmuurin läpi olevilla säädettävillä korvausilmaventtiileillä. Ryömintätilan riittäväksi alipaineeksi ulkoilmaan nähden valittiin 10 Pa, jotta varmistuttaisiin ettei ryömintätilasta virtaa ilmaa ja epäpuhtauksia oleskelutiloihin. Koska ryömintätilan alipaineena käytettiin vakioarvoa, voitiin korvausilmavirran suuruutta säätää korvausilmaventtiilin avulla halutun suuruiseksi.

Mallinnettavaksi 2D maa- ja perustusrakenteeksi valittiin periaatteeltaan kaksi erilaista maapohjarakennetta: avoin ja ilmatiivistetty pohjarakenne. Avoimen pohjarakenteen tapauksessa ulkoa ryömintätilaan virtaa ryömintätilan alipaineesta johtuen soratäytön kautta kosteaa ilmaa. Ilmatiivistetyn pohjarakenteen tarkoituksena oli tiivistää ryömintätilan maanpinta estäen soratäytön kautta ryömintätilaan tuleva kostea ilmavirta. Tutkitut ilmatiivistysrakenteet olivat betonilaatta 50 mm, betonilaatta 50 mm + 70 mm kova lämmöneriste (XPS), 70 mm kova lämmöneriste (XPS) ja höyrynsulkumuovi. Tutkittuja avointa ja ilmatiivistettyjä pohjarakenteita havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Tutkittujen pohjarakenteiden havainnekuva (tarkennus kokonaismallista 10 m x 12,8 m). Pohjarakenteiden rakenneosat on esitetty alkaen ryömintätilan puolelta maarakenteita kohden.

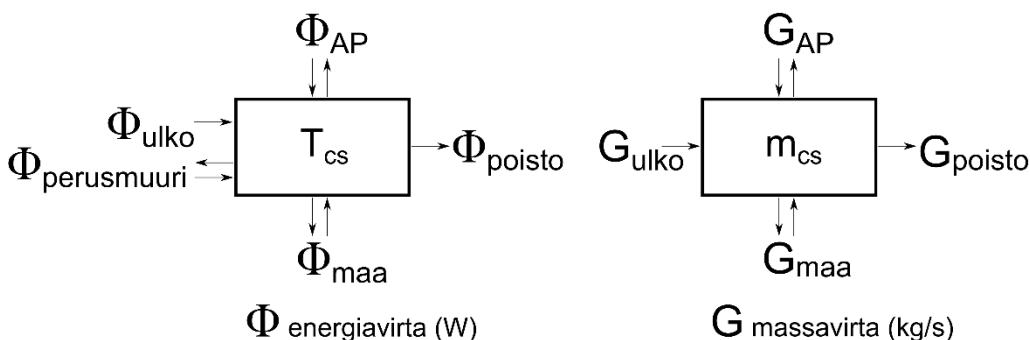
Tutkituissa maa- ja perustusrakenteissa (kuva 1) perustusten antura (1) oli betonia ja perusmuuri (2) koostui kevytsoraharkoista. Perustusten routasuojaus (3) toteutettiin perusmuurin molemmiin puolin olevilla vaakasuorilla kovilla lämmöneristeillä (EPS) sekä perusmuuria vasten olleella kovalla lämmöneristeellä (EPS). Perustusten soratäyttö (4) koostui kauttaaltaan kapillaarikatkona toimivasta sepelistä, jossa ei oletettu tapahtuvan kapillaarista kosteudensiirtymistä. Sepelin kosteuskapasiteetti oletettiin merkityksettömäksi [3]. Perusmaa (5) käsiteltiin lämpöä johtavana ilmatiiviinä kiinteänä aineena, jolla oli vakio lämmönjohtavuus. Perusmaan pinta oletettiin säilyvän kauttaaltaan pinnan lämpötilaa vastaavassa vesihöyryn kyllästyspitoisuudessa.

Sepelin ilmanläpäisevyydellä on suuri vaikutus ryömintätilan lämpö- ja kosteusoloihin. Sepelin permeabiliteetti voi vaihdella suuresti riippuen esimerkiksi käytettävästä raekoosta ja sen tiiveydestä. Tutkimuksessa käytettäväksi sepelin permeabiliteeteiksi valittiin $\kappa_1 = 1e-9 \text{ m}^2$ ja $\kappa_2 = 1e-8 \text{ m}^2$. Permeabiliteetit $1e-9 \text{ m}^2$ – $1e-8 \text{ m}^2$ edustavat Suomessa tyypillisesti käytettyjä täyttösora-aineita. Tällaisten täyttösora-ainesten raekoko on useista millimetreistä kymmeniin millimetreihin. [4] Muut rakenteet oletettiin ilmatiiviiksi.

Mallinnettu 1D-alapohja koostui 175 mm paksuisesta betonisesta ontelolaatasta ja ontelolaatan alapinnassa ryömintätilan puolella olevasta 220 mm paksuisesta kovasta lämmöneristeestä (XPS). Pintamateriaaleja ei otettu huomioon alapohjarakenteessa lämpimän ja kostean huoneilman kosteusrasituksen maksimoimiseksi lattiarakenteessa. Alapohjarakenteen yksiulotteisuudesta johtuen rakenteen malli kuvasi äärettömän leveää ja vakiopaksuista, kerroksellista rakennetta. Näin ollen alapohjarakenne ei huomioinut ulkolämpötilan vaikutusta alapohjarakenteeseen rakennuksen ulkoseinien läheisyydessä.

Maa- ja perustusrakenteiden todellista kolmiulotteisuuden vaikutusta soratäytössä virtaavaan ilmaan pyrittiin ottamaan jonkin verran huomioon Darcyn lain [5] mukaisessa tilavuusvirrassa tehollisella piirillä, jota sovellettiin myös täysin sekoittuneen ilmatilan energia- ja massataseyhtälöissä (kuva 2). Tehollisen piirin tavoitteena oli ottaa huomioon nurkka-alueiden vaikutus ryömintätilaan tulevan ilmavirran suuruuteen 2D tasossa. Toisin sanoen tehollinen piiri kuvaa sitä, kuinka suuri tarvitsee olla nurkattoman rakennuksen piiri, jotta maan kautta tuleva ilmavirta olisi yhtä suuri kuin nurkallisessa rakennuksessa. Tehollisen piirin määrittämiseen käytettiin 3D-mallia soratäytöstä. Lisätietoa tehollisesta piiristä on saatavilla [1].

0D-ryömintätilan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden simuloimiseksi ryömintätilalle muodostettiin massan ja energian säilymistä kuvaavat tasapainoyhtälöt, joissa muuttujina olivat ryömintätilan lämpötila T_{cs} (°C) ja vesihöyryn massa m_{cs} (kg). Kuvassa 2 on havainnollistettu ryömintätilan massan- ja energianvaihtoa ympäristön kanssa tasapainoyhtälöiden termien avulla. Avoimen ja ilmatiivistetyn pohjarakenteiden tasapainoyhtälöt poikkeavat toisistaan maan kautta tulevan ilmavirtauksen osalta.



Kuva 2. Ryömintätilan tasapainoyhtälöiden energia- ja massa virtojen havainnekuva.

Ryömintätilan massan- ja energianvaihto ympäristön kanssa tapahtui konvektiivisesti virtausten mukana sekä diffuusiolla (massa) ja johtumalla (energia) ryömintätilan ilman ja pintojen välillä. Mahdollinen kondenssi huomioitiin tasapainoyhtälöissä nielu- ja lähdetermein.

2.2 Lämpö- ja kosteustekninen mallinnus COMSOL Multiphysicillä

Tässä luvussa esitellään alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan lämpö- ja kosteusteknistä mallinnusta elementtimenetelmään perustuvalla monifysiikkamallinnusohjelma COMSOL Multiphysicsillä. Mallintaminen tapahtuu ohjelmassa yhdistelemällä mahdolliseen tarkasteltavaan geometriaan tai geometrioihin ohjelmassa olevia erilaisia fysiikkamoduuleja, jotka mallintavat osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla moduulin käsittelemää fysikaalista ilmiötä. Ohjelmassa on myös moduuleja, joihin käyttäjä voi itse kirjoittaa haluamiaan yhtälöitä fysikaalisten ilmiöiden kuvaamiseksi. [6]

Tutkimuksessa COMSOL Multiphysicsillä simuloitu kokonaismalli koostui useasta toisiinsa kytketyistä eriulotteisista osamalleista. Mallin koostuessa eri ulottuvuuksissa ja toisistaan erillään olevista osamalleista, tarvitsee osamallien välillä siirtyä osamalleista saatavaa tietoa. Osamallien mahdolliset erilaiset ulottuvuudet tarvitsee ottaa huomioon tiedonsiirrossa: korkeamman ulottuvuuden osamallista saatava tieto tarvitsee muuttaa alemmassa ulottuvuudessa olevan osamallin vaatimaan muotoon, esimerkiksi integraalioperaattorilla \int (). [6]

Sepelissä ilma virtaa ryömintätilan ja ulkoilman välisestä paine-erosta johtuen. Sepelitäytön huokosissa vallitseva stationaarinen virtauskenttä ratkaistiin käyttämällä COMSOL Multiphysicsin ”The Darcy’s Law Interface”-moduulia. Moduuli käyttää Darcyn lain mukaista virtauskentän teoriaa [5]. Maa- ja perustusrakenteissa lämpöä siirtyi sekä huokoisessa aineessa johtumalla ja konvektiolla että kiinteässä aineessa johtumalla, joita mallinnettiin COMSOL Multiphysicsin ”The Heat Transfer in Porous Media” moduulilla. Sepelin ilmahuokosissa voi tapahtua kosteuden siirtymistä diffuusion ja konvektion avulla, jota käytetty COMSOL Multiphysicsin moduuli ”The Transport of dilute species” mallinsi konvektio-diffuusio yhtälön avulla [7]. Ennen moduulien käyttöä tarvitsee mahdollisia konvektio-terminiä varten määrittää sepelissä virtaavalle ilmalle Darcyn lain mukainen nopeuskenttä ”The Darcy’s Law Interface”-moduulilla. Alapohjarakenteen ja ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden betoni- ja lämmöneristeosien mallintamisessa käytettiin yhdistettyä lämmön- ja kosteudensiirtoa kuvaavia yhtälöitä, joita käytetään esimerkiksi WUFI-nimisessä kosteuden- ja lämmönsiirron mallinnusohjelmassa [8]. Yhtälöt implementoitiin malliin COMSOL Multiphysicsin osittaisdifferentiaaliyhtälöitä ratkaisevan ”The Coefficient Form”-moduulin avulla [6]. Ryömintätilan olosuhteiden tasapainoyhtälöt muodostettiin erilaisia differentiaaliyhtälöitä ratkovan ”The Global ODEs and DAEs” moduulin avulla. [6]

2.3 Laskennan lähtötiedot

2.3.1 Tutkitut ryömintätilan ilmanvaihtuvuudet

Rakenneratkaisusta riippuen ryömintätilan alipaineisuuden seurauksena ryömintätilaan voi virrata ulkoa ilmaa sekä korvausilmaventtiilin että sepelin kautta. Avoimen pohjarakenteen omaavaan ryömintätilaan tuleva kokonaisilmavirran aiheuttama ilmanvaihtuvuus n_{tot} (1/h) koostui sepelin kautta tulevasta ilmavirran aiheuttamasta ilmavaihtuvuudesta n_{maa} (1/h) sekä korvausilmaventtiilin kautta ulkoa tulevan korvausilmavirran aiheuttamasta ilmanvaihtuvuudesta n_{ulko} (1/h). Ilmatiivistetyn pohjarakenteen omaavan ryömintätilan kokonaisilmavaihtuvuus koostui pelkästään ulkoa tulevan korvausilmavirran aiheuttamasta ilmanvaihtuvuudesta pohjarakenteen ilmatiivistyksen takia. Työssä tarkasteltaviksi korvausilmavirran aiheuttamiksi ilmanvaihtuvuuksiksi alipaineistetuille ryömintätiloille valittiin 0,2 1/h, 0,4 1/h, 0,6 1/h, 0,8 1/h, 1,0 1/h, 2,0 1/h ja 5,0 1/h. Ilmanvaihtuvuuksiksi pyrittiin valitsemaan voimassaolevien suositusten (0,5 – 1,0 1/h [9]) mukaisia arvoja tulosten vertailtavuuden vuoksi. Suositukset ovat pelkän korvausilmaventtiilin kautta tulevan korvausilmavirran aiheuttamia ilmanvaihtuvuuksia. Soratäytön 3D-mallista ”The Darcy’s Law Interface”-moduulin avulla määritetyt sepelin kautta tulevat tilavuusvirtojen aiheuttamat ilmanvaihtuvuudet sepelin permeabiliteeteille $1e-8 \text{ m}^2$ ja $1e-9 \text{ m}^2$ olivat 1,0 1/h ja 0,1 1/h. Taulukossa 1 on esitetty tarkemmin tutkimuksessa käytettyjä ilmanvaihtuvuuksia. Taulukossa on myös esitetty ulkoa tulevan korvausilmavirran tilavuusvirran R_{ulko} (m^3/s) suuruksia.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytettyjen eri rakenneratkaisuiden ilmanvaihtuvuuksien suuruuksia sekä korvausilmavirran tilavuusvirtoja.

Ilmastiivistetyt rakenteet		1e-8 m ²	1e-9 m ²
$n_{ulko}=n_{tot}$ (1/h)	R_{ulko} (m ³ /s)	$n_{ulko} + n_{maa} = n_{tot}$ (1/h)	
0,2	0,006	0,2 + 1,0 = 1,2	0,2 + 0,1 = 0,3
0,4	0,012	0,4 + 1,0 = 1,4	0,4 + 0,1 = 0,5
0,6	0,017	0,6 + 1,0 = 1,6	0,6 + 0,1 = 0,7
0,8	0,023	0,8 + 1,0 = 1,8	0,8 + 0,1 = 0,9
1,0	0,029	1,0 + 1,0 = 2,0	1,0 + 0,1 = 1,1
2,0	0,058	2,0 + 1,0 = 3,0	2,0 + 0,1 = 2,1
5,0	0,140	5,0 + 1,0 = 6,0	5,0 + 0,1 = 5,1

Korvausilman aiheuttamaksi pienimmäksi ilmanvaihtuvuudeksi valittiin 0,2 1/h, koska ryömintätila ei koskaan saisi olla täysin tuulettumaton. Tuulettumattomaan ryömintätilaan kertyy enemmän kosteutta, mikrobeja, radonia ja muita terveydelle haitallisia aineita. Näin ollen lattiarakenteiden vuotokohdista saattaa virrata ryömintätilan yläpuolisiin tiloihin kasvaneiden pitoisuuksien takia enemmän terveydelle haitallisia aineita. [4] Ilmanvaihtuvuuksien 2,0 1/h ja 5,0 1/h tarkoituksena oli selvittää homeindeksin käyttäytymistä suuremmilla korvausilman vaihtuvuuksilla ja samalla myös homeindeksin käyttäytymistä ryömintätilan olosuhteiden lähestyessä ulkoilman olosuhteita. Lisäksi ryömintätilan homeindeksejä tarkasteltiin myös ulkoilman olosuhteilla, jolloin tarkoituksena oli kuvata äärettömän suuren ilmanvaihtuvuuden vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin. Näin voitiin selvittää ilmanvaihtuvuuden kasvattamisen vaikutus homeindeksiin.

2.3.2 Materiaaliominaisuudet ja tarkasteluolosuhteet

Tehdyssä tutkimuksessa käytettiin vuosina 2009 - 2012 toteutetussa FRAME-tutkimusprojektissa esitettyjä rakennusmateriaalien aineominaisuuksia. FRAME-tutkimusprojektissa selvitettiin ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia rakennusten lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan Suomen ilmastossa. Ulkoilman testiolosuhteina käytettiin kahta peräkkäistä Jokioinen 2004-testivuotta. Testivuosi on todettu FRAME-tutkimusprojektissa Suomessa kriittiseksi rakennusfysikaaliseksi testivuodeksi tarkasteltaessa homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen sisällä. [10]

Rakennuksen sisäilman lämpötila pidettiin ympärivuoden vakiona $T_s = 21$ °C. Sisäilman suhteellinen kosteus oletettiin vaihtelevan vuoden aikana ulkoilman suhteellisen kosteuden ja sisäilman kosteuslisän vaikutuksesta. Sisäilman kosteuslisä kuvaa rakennuksen käytöstä ja asumisesta aiheutuvaa lisäkosteuden määrää sisäilmassa. Tutkimuksessa käytettiin kosteusluokan 2 mukaista kosteuslisää. [9] Työssä ei tarkasteltu tarkemmin rakennuksen sisäpuolisia tai ulkopuolisia kosteuslähteitä.

2.4 Alipaineistetun rakenneratkaisun toimivuuden arviointi

Olosuhteiden alttiutta homeen kasvulle ryömintätilassa arvioitiin Suomalaisella homemallilla, jonka tarkoituksena on arvioida ensisijaisesti homeen kasvun riskiä materiaalissa [11]. Malli tarkastelee homeen kasvun yleistä riskiä, ei tietyn homeen [12]. Suomalaisessa homemallissa homeen kasvua materiaalin pinnalla kuvaa homeindeksi M (-), joka jaetaan 7 eri luokkaan homeen pinnan peittävyuden perusteella. Homeindeksi voi saada arvoja väliltä 0-6 [11]. Tämän työn tarkasteluissa turvallisena homeindeksin raja-arvona pidettiin $M < 1$. Lisää tietoa Suomalaisesta homemallista on saatavilla esimerkiksi julkaisuista [11] ja [12]. Tässä työssä tarkasteltiin poistoilmanvaihdolla alipaineistetun tuuletetun ryömintätilan

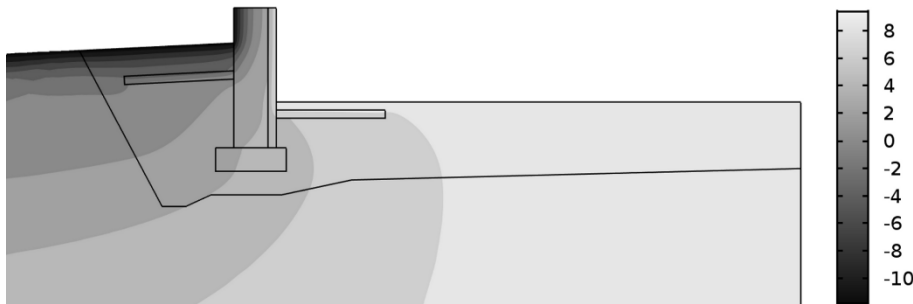
homehtumisriskiä kahdella eri homehtumisherkkyyssluokalla: HHL3 ja HHL1. Tarkasteltaessa kivirakenteissa ryömintätilassa (betoni ja kevytsora) olevia puhtaita materiaalipintoja, ryömintätilan homehtumisherkkyyss luokkana voidaan käyttää luokkaa HHL3 [12]. Myös kovat lämmöneristeet kuuluvat samaan luokkaan. Kuitenkin todellinen tuulettuva ryömintätila sisältää epäpuhtauksia, kuten esimerkiksi orgaanista ainetta. Orgaaninen aine voi olla esimerkiksi ryömintätilaan korvausilmavirran mukana kulkeutunutta siitepölyä. Materiaalin pinnalla oleva orgaaninen aine lisää homeen kasvun riskiä merkittävästi [11]. Tämän perusteella tuulettuvan ryömintätilan homeen kasvun riskiä tarkasteltiin myös homehtumisherkkyyssluokalla HHL1. Todellinen ryömintätila on puhtausolosuhteittensa kuitenkin lähempänä HHL1 epäpuhtauksien takia.

3. Tulokset

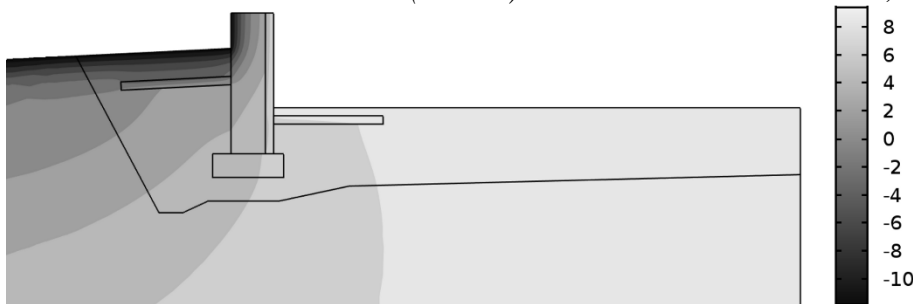
Tulosdatan suuren määrän vuoksi kaikkien eri rakenneratkaisuiden ryömintätilojen tuloksia ei voida esittää. Tuloksissa käsiteltävät rakenneratkaisut ovat avoin pohjarakenne molemmilla sepelin permeabiliteeteilla ($1e-8 \text{ m}^2$ ja $1e-9 \text{ m}^2$) sekä 50 mm paksuisella betonilaatalla ilmatiivistetty rakenneratkaisu. Kaikissa esitettävissä tuloksissa korvausilmaventtiilin kautta ryömintätilaan tuleva korvausilmavirta on $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$, jota vastaavat ryömintätilan kokonaisilmanvaihtuvuudet on esitetty taulukossa 1. Tulosten ajankohta on 2. simulointivuoden tammikuu, jolloin simuloinnin alusta on kulunut 8772 tuntia. Artikkelissa esitettyjen laskentatapausten tulosten pohjalta ei ole mahdollista päätellä pelkän ilmantiivistyksen vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin. Lisätieto tutkimuksen tuloksista ja johtopäätöksistä on saatavilla [1]

3.1 Maa- perustusrakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet

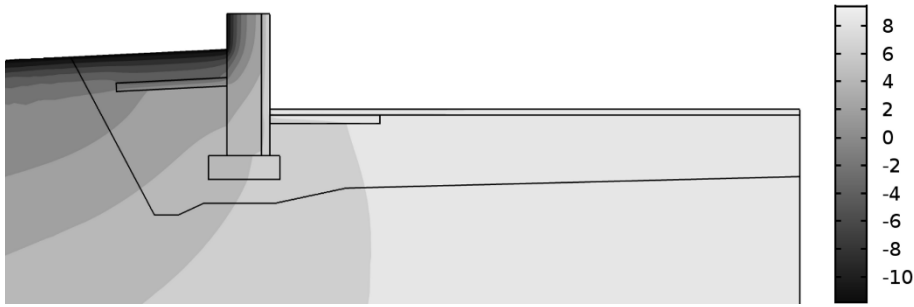
Seuraavaksi esitellään maa- ja perustusrakenteiden simuloinnista saatuja lämpötila- ja suhteellisten kosteuksien kosteus kenttien tuloksia. Avointen pohjarakenteiden lämpötilakenttien tuloksia on esitetty kuvissa 3 ja 4 ja suhteellisen kosteuden tuloskenttiä kuvissa 6 ja 7. Betonilaatalla ilmatiivistetyn alapohjarakenteen esitettävä lämpötilakenttä on esitetty kuvassa 5 ja suhteellisen kosteuden kosteus kenttä kuvassa 8.



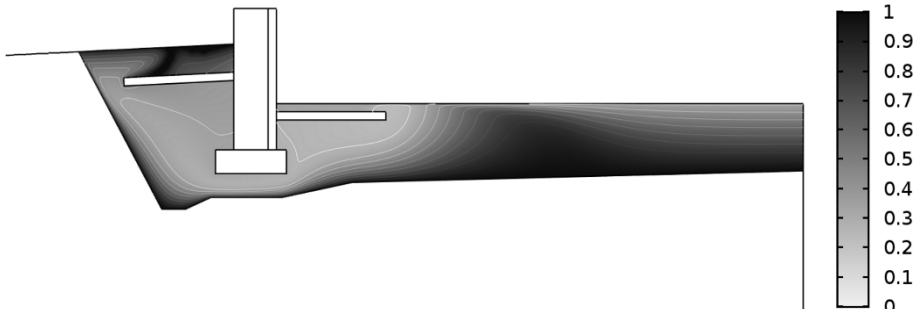
Kuva 3. Avoimen pohjarakenteen (sepelin permeabiliteetti $1e-8 \text{ m}^2$) lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.



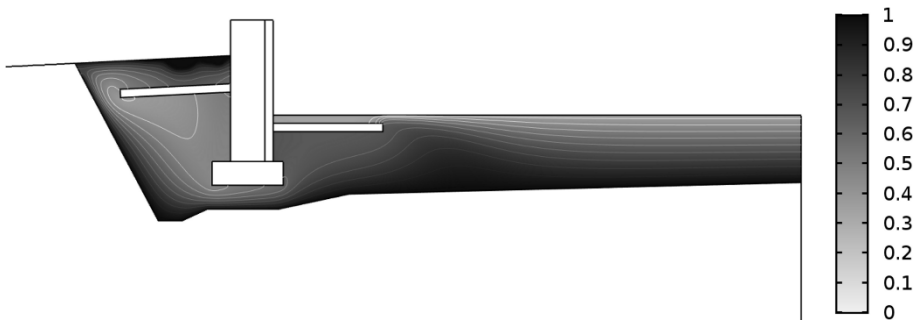
Kuva 4. Avoimen pohjarakenteen (sepelin permeabiliteetti $1e-9 \text{ m}^2$) lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 5. Betonilla ilmatiivistetyn pohjarakenteen lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 6. Avoimen pohjarakenteen (sepelin permeabiliteetti $1e-8 \text{ m}^2$) kosteusKenttä (RH) 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 7. Avoimen pohjarakenteen (sepelin permeabiliteetti $1e-9 \text{ m}^2$) kosteusKenttä (RH) 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.

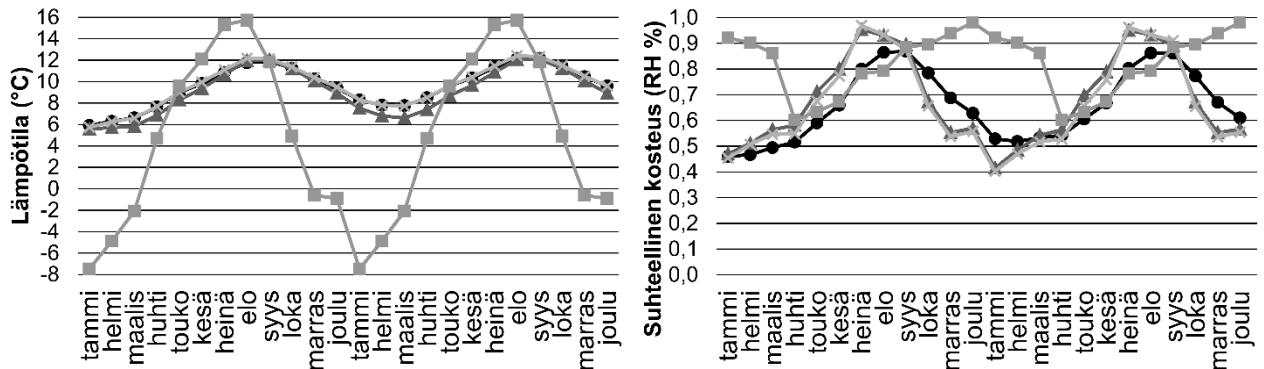


Kuva 8. Betonilla ilmatiivistetyn pohjarakenteen kosteusKenttä (RH) 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.

Lämpötilakenttien kuvista 3, 4 ja 5 on havaittavissa, että maarakenteen ilmatiiveydellä ei ole merkittävää vaikutusta sepelin lämpötilakenttään. Kuitenkin tarkasteltaessa sepelin suhteellisen kosteuden arvoja kuvissa 6, 7 ja 8 on havaittavissa tiiveyden vaikutuksen suhteellisten kosteuksien arvoihin olevan suuri: mitä vähemmän ilmaa kulkee sepelikerroksen läpi, sitä suurempia ovat suhteellisen kosteuden arvot sepelissä.

3.2 Ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteet

Seuraavaksi kuvassa 9 esitellään tuloksissa käsiteltävien rakennerratkaisuiden ryömintätilojen 9a) lämpötilojen ja 9b) suhteellisten kosteuksien keskiarvoja simuloidulta 2 vuoden ajanjaksolta. Kuvissa on mukana myös Jokioinen 2004 - testisäädäntä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuukausikohtaiset keskiarvot.



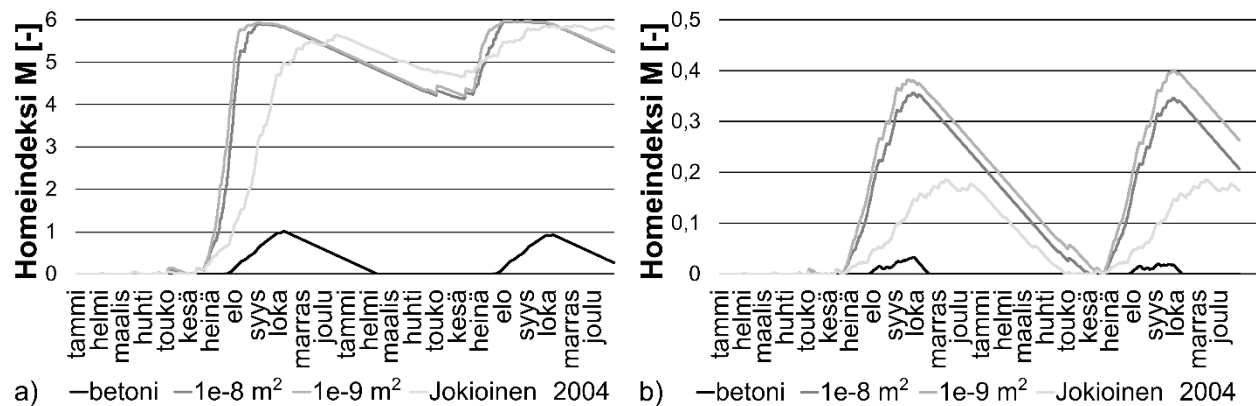
a) ◆betoni ▲1e-8 m² ✱1e-9 m² ■Jokioinen 2004 b) ◆betoni ▲1e-8 m² ✱1e-9 m² ■Jokioinen 2004

Kuva 9. Tuloksissa käsiteltävien rakennerratkaisuiden ryömintätilan a) lämpötilan ja b) suhteellisen kosteuden keskiarvot 2. vuoden ajanjaksolla korvausilmavirran ollessa 0,017 m³/s.

Kuvasta 9a) on havaittavissa, että lämpötilakäyttäytymiset permealiteetin 1e-9 m² omaavalla avoimella pohjarakenteella ja betonilla ilmatiivistetyllä pohjarakenteella ovat keskenään samanlaiset. Ilmaa läpäisevämmän sepelin (1e-8 m²) tapauksen ryömintätilan matalammat lämpötilat selittyvät hieman matalammilla sepelin lämpötilakentän arvoilla talvella (kuva 3), jolloin kylmä ulkoilma viilentää maata. Kuitenkin tarkasteltaessa rakennerratkaisuiden ryömintätilojen suhteellisia kosteuksia kuvassa 9b), on avointen pohjarakenteiden kosteuskäyttäytymiset lähempänä toisiaan kuin betonilla ilmatiivistetyn ryömintätilan. Myös avointen pohjarakenteiden ryömintätilojen suhteellisten kosteuksien muutokset ovat voimakkaampia sekä arvot korkeampia ja matalampia kuin betonilla ilmatiivistetyn ryömintätilan. Tämä selittyy betonilaatan kosteuskapasiteetilla, jonka seurauksena betoni sitoo itseensä kosteutta tasaten ryömintätilan suhteellisen kosteuden muutoksia. Tuloksista tarkasteltaessa on kuitenkin muistettava, että tarkasteltujen tapausten ryömintätilojen ilmanvaihtuvuudet eivät ole saman suuruiset (luku 2.3.1).

3.3 Ryömintätilan homeindeksit

Seuraavaksi esitellään tuloksissa käsiteltävien rakennerratkaisuiden ryömintätilojen homeindeksin arvoja simuloidulta 2 vuoden ajanjaksolta. Kuvassa 10a) on esitetty käsiteltävien ryömintätilojen homeindeksit homehtumisherkkyysluokalla HHL1 ja kuvassa 10b) luokalla HHL3. Kuvissa on mukana myös Jokioinen 2004- testisäädäntä (lämpötila ja suhteellinen kosteus) perusteella määritetyt homeindeksit molemmilla tarkastelluilla homehtumisherkkyysluokilla.



Kuva 10. Ryömintätilan Suomalaisen homemallin mukaiset homeindeksit homehtumisherkkyysluokilla a) HHL1 ja b) HHL3 2. vuoden ajanjaksolla korvausilmavirran ollessa 0,017 m³/s.

Kuvan 10a) perusteella homehtumisherkkyysluokan HHL1 rakenneratkaisuista ainoastaan betonin homeindeksin arvot ovat ainoastaan vähän yli sallitun raja-arvo 1 tai sen alle. Kuitenkin avoimen pohjarakenteiden homeindekseihin verrattuna betonilla ilmatiivistettyä rakenneratkaisua voidaan pitää rakennusfysikaalisesti hyväksyttävänä. Kuitenkin kuvan 10b) homehtumisherkkyysluokalla HHL3 (ei sisällä orgaanista ainetta) kaikkien tutkittujen rakenteiden arvot jäävät huomattavasti alle 1 raja-arvon ($M \leq 0,4$). Huomioitavaa on myös, että avointen pohjarakenteiden tapausten homeindeksien kasvunopeus molemmilla homehtumisherkkyysluokilla on voimakkaampaa kuin Jokioinen 2004 - säädätällä lasketun homeindeksin. Avointen pohjarakenteiden homeindeksien arvot ovat myös suurempia kuin Jokioinen 2004 - säädätän.

Homeindeksit määritettiin ryömintätilan ilmatilan olosuhteiden arvoilla. Todellisuudessa home ei kasva ryömintätilan ilmassa, vaan jossakin siihen rajoittuvassa pinnassa. Pinnassa esiintyvät olosuhteet eivät ole aivan samat kuin ilmassa, koska pinnan olosuhteisiin vaikuttavat pintamateriaalin lämpö- ja kosteuskapasiteetti ja niistä aiheutuvat hitaammat olosuhteiden muutokset pinnan vieressä. Tämä tyypillisesti alentaa homeindeksin arvoa pinnalla verrattuna ilmatilaan.

4. Yhteenveto

Tämä artikkeli on yhteenveto alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliseen simulointiin liittyvästä tutkimuksesta Suomen sääoloissa. Tutkimuksessa mallinnettiin suorakaiteen muotoisen rakennuksen alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteita elementtimenetelmään perustuvalla monifysiikkamallinnusohjelma COMSOL Multiphysicsillä. Mallinnusteknisistä syistä kokonaismalli koostui eri ulottuvuuksissa olevista osamalleista. Simuloinnin tuloksena saatiin ryömintätiloille ajasta riippuvia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja, joiden perusteella Suomalaista homemallia käyttäen laskettiin ryömintätiloille homeen kasvun riskiä kuvaavia homeindeksin arvoja homehtumisherkkyysluokilla HHL3 (kohtalaisen kestävä puhdas materiaalipinta) ja HHL1 (materiaalipinnan päällä on orgaanista ainetta). Tutkimuksen tuloksen perusteella ryömintätilan maapohjan ilmantiiveydellä, ilmatiivistysrakenteella ja ilmatiivistysmateriaaleilla on suuri vaikutus alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Tutkimuksessa tehtiin tulosten tarkkuuteen vaikuttavia fysikaalisia yksinkertaistuksia, kuten esimerkiksi sepelin kosteuskapasiteetin olettaminen merkityksettömäksi, laskenta-ajan pienentämiseksi. Artikkelissa esitettyjen tulosten tarkoituksena on havainnollistaa alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan

simulointia. Tulosten perusteella ei ole mahdollista tehdä johtopäätöksiä pelkän ilmatiivistyksen vaikutuksista ryömintätilan olosuhteisiin betonilaatan kosteuskapasiteetin takia.

Lähdeluettelo

- [1] Salo J. 2017. Alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliset FEM simuloinnit. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. 86 s. + liitteet 3s. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201705241470>.
- [2] RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet, Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [3] Rantala, J. ja Leivo, V. 2007. Thermal and moisture parameters of a dry coarse-grained fill or drainage layer. *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 8, pp. 1726–1731.
- [4] Arvela H, Holmgren O ja Reisbacka H. 2012. STUK-A252 Asuntojen radonkorjaaminen. Helsinki 2012, 138 s. + liitteet 3 s.
- [5] Coutelieiris, F.A. ja Delgado, J.M.P.Q. 2012. *Transport Processes in Porous Media*. 2012th edn, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg. 236 s.
- [6] COMSOL Multiphysics. 2016. COMSOL Multiphysics Reference Manual 5.2a. COMSOL AB.
- [7] Stocker, T. 2011. *Introduction to Climate Modelling*. 1. painos. Springer Verlag, DE. 179 s.
- [8] Künzeli, H. 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Väitöskirja. Fraunhofer Institute of Building Physics. Holzkirchen, Germany. 64 s.
- [9] RIL 107. 2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje. Tekninen raportti. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [10] Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tekninen raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 159. 354 s. + liitteet 43 s.
- [11] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. 2010. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA. December 5–9. ASHRAE, DOE, ORNL, Session II-B*, 10 s.
- [12] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L. & Lähdesmäki, K. 2010. Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, Vol. 33 (3), pp. 201–224.

The application and the potential of QUB/e in the Nordic countries: new perspectives for fast in-situ measurements of the building thermal performance

Andrea Mazzucco¹ and Jussi Jokinen²

¹ Saint-Gobain Isover DK, Vamdrup, Denmark

² Saint-Gobain Finland Oy Isover, Helsinki, Finland

Abstract

This work presents the first results of an ongoing measurement campaign in Denmark where the QUB/e method is deployed to obtain the in-situ characterization of the overall thermal performance of the dwelling and the local U-values of the main building structures.

An overview of the theory is provided alongside practical information on the equipment needed and a comparison with well-established thermal diagnosis methods. Finally, the potential of the QUB/e method is illustrated through measurement results and contextualized for the building sector in the Nordic region.

1. Introduction

The Nordic countries have a well-established tradition of demanding requirements for the energy consumption of buildings [1]. Buildings are rated on the basis of an assessment of the energy performance that often relies on theoretical calculations. When in-situ measurements are carried out it is possible to make a comparison between the actual energy performance and the predicted values. Such a comparison often shows a discrepancy (the so called "performance gap") that is generally attributed to factors linked to thermal property deterioration over time, thermal bridges, moisture infiltrations and quality of construction (e.g. mistakes in installation/poor detailing).

Current thermal-diagnosis methods often result in expensive and time-consuming tests that prevent their large scale application. In addition, when these tests have the objective to determine the performance improvement after renovation, they often cause a high level of annoyance to the occupants, as the dwelling must be empty during the measurements for a period up to 20 days [2]. The lack of a convenient technique has prevented this type of measurements to become a normal practice in the construction sector contributing to the customer's feeling of mistrust towards the actual quality of the delivered project. It has become normal to expect and accept that the final performance might differ from what was promised in the design phase.

This work has the objective to present the QUB/e method as a step forward towards the solution to current methods' limitations and to contextualize the implications of its use for the building sector in the Nordic countries. This is exemplified by the first results of an ongoing measurement campaign in Denmark where the QUB/e method is deployed to obtain an in-situ characterization of the thermal performance of the dwelling and of its main heat loss-contributing components (e.g. external walls, glazing).

2. The QUB/e method: theory and previous results

In this Section the principle of the QUB/e method as well as the results from two measured dwellings are discussed.

2.1 The method

Research on a new in-situ thermal diagnosis method has risen from the demand to find a valid alternative to current measurement techniques whose main drawbacks include the complexity of the set-up, the time needed to perform a test and the lack of transparency on the accuracy [3], [4]. QUB/e is the state-of-the-art result of such a research effort carried out in SGR (Saint-Gobain Recherche) and Isover FR and is based on the QUB method [5] and the heat-flow-meter (HFM) technique [6]. It is an experimental method that has been developed with the aim to perform accurate fast in-situ measurements of the thermal performance of the building envelope with limited equipment. It determines the overall heat loss coefficient (HLC) of the dwelling and the in-loco U values of the main building structures in a single night without occupancy.

In a QUB test the measurement of the indoor/outdoor temperatures and of the heating power ($P(t)$) during one induced heating and one free cooling phases is used to solve the resistance (R)-capacitance (C) model of Figure 1 to determine the whole HLC.

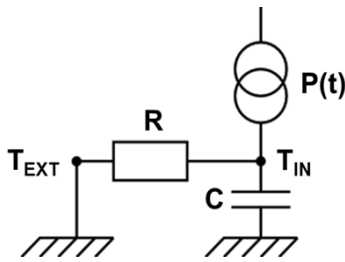


Figure 1. Schematic of the R-C model of the building.

In this model the power provided to the dwelling is compensated by the heat losses through the structures and the heat stored in the building fabric as described in Eq. (1):

$$P(t) = HLC \cdot (T_{in} - T_{ext}) + C \cdot \frac{dT_{in}}{dt} \quad (1)$$

The building's steady-state HLC in absence of occupants and solar irradiance can be expressed as:

$$HLC = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2)$$

where Q = total measured heat input, W
 ΔT = difference between internal and external temperatures, K

With the QUB/e method, heat flux densities and adjacent air temperatures for each building element of interest are registered during a QUB test. The local U-values are then derived as [7]:

$$U = (a_{cooling} q_{heating} - a_{heating} q_{cooling}) / (a_{cooling} \Delta T_{heating} - a_{heating} \Delta T_{cooling}) \quad (3)$$

where q = mean heat flux density, W/m^2
 a = the slope of the inside air temperature curve, $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$
 ΔT = difference between internal and external temperatures, K

For more details on the QUB and QUB/e theory the reader is referred to Refs. [5], [7], [8].

2.1.1 The QUB/e measurement in practice

The dynamic measurement is carried out at night in an empty dwelling to avoid the influence of solar radiation and occupants and it is composed of two half cycles: induced heating and free cooling. During the first phase, constant heating power is provided to the dwelling and its value is constantly measured. In the next phase the heating is shut down and the building is let cool down. A full test can be performed in one night without occupancy. The main equipment is listed in Table 1.

Table 1. Main items of equipment used in this work to perform a QUB/e test.

QUB	QUB/e (in addition to QUB)
Temperature sensors (e.g. commercial wireless sensors)	TC-K
QUB controller	Heat flux plate (HFP)
Smart electrical plugs	Data logger
Electrical fan heaters	

After the sensors are set up, one or more tests can be scheduled and automatically launched through a digital interface which also performs the first data analysis providing the overall HLC. Besides comparing the measured/design HLC and in-situ U-values to determine the performance gap, it is also possible to use the measured information to have an indirect quantification of the heat losses through infiltration and thermal bridges as shown in the result section.

2.1.2 Comparison with quasi-steady-state measuring techniques and validation

The most evident advantage of dynamic methods compared to quasi-steady-state techniques is the capability to estimate the thermal performance of a building in a shorter period of time [9]. As a result the time required to fully characterize thermally a non-occupied apartment decreases from 14-20 days [2] for quasi-steady-state methods (i.e. the co-heating method for the HLC measurement [10] and the Heat Flow Meter method [6] for the local U-values) to 1 night for QUB/e. Such a time reduction represents significant cost savings as, on one side, fewer measuring days means a smaller cost of work and, on the other side, it means a shorter period of time where the occupant has to be moved to a temporary accommodation that the building owner has to pay for. This last point is particularly important for the case of social housing in the Nordic countries where the tenants participate to democratic committees that can approve or refuse retrofit interventions. Reducing the annoyance caused to the occupants mean having a higher chance that the measurement will be approved.

Finally, experimental investigations carried out in climate chambers have validated the QUB/e method against the reference quasi-steady-state techniques showing comparable accuracy. The relative difference in the HLC estimation is in the order of 10-20% and that for the U-values was found to be within the uncertainty bound of the measurement methods [7]. Ongoing work is focusing on the validation of the method in the field.

2.2 Results

In this Section the results of the first measurements carried out in Denmark are used to illustrate the use/potential of the QUB/e method. For this reason two typologies of building are chosen: one apartment in a multi-family house (MFH) and a single-family house (SFH). In both cases the buildings are from the 1960-1970 and the aim was to perform a detailed thermal diagnosis of the dwelling before its retrofitting. Further measurements are planned after renovation is complete.

2.2.1 Multi-family house

The measured apartment (ground floor area: 75 m²) is located at the first floor of a four storey building in the city of Fredrikshavn and it exemplifies a typical situation that is encountered during a test: the composition and thermal information of the building structures is not known in detail and has to be estimated through inspection. A summary is given in Table 2 along with the measured U-values.

Table 2. Measured and theoretical U value of each element; MFH.

Element	Measured U value [W/m ² /K]	Expected U value [W/m ² /K]	Discrepancy [W/m ² /K]	Area [m ²]
External walls (concrete)	1.56 ± 0.14	1.42	0.14 ± 0.14	53
Glazings (double)	2.6 ± 0.7	2.1	0.5 ± 0.7	27
Wall to staircase	0.87 ± 0.08	0.7	0.1 ± 0.08	8

A comparison between the expected (or calculated) and measured U-values shows that the largest disparity (0.5 ± 0.7 W/m²/K or 26 ± 34%) occurs for the glazings (not older than 2008) and for the external walls (0.14 ± 0.14 W/m²/K or 10 ± 10%).

In Figure 2(a) the measured average indoor/outdoor temperatures and heaters electrical power are reported for both the heating and the cooling phases over one night of measurement.

In Figure 2(b) the measured U-values are propagated with the area of each element to obtain the heat loss repartition and their contribution to the global HLC. It can be seen that the measured global HLC is: 113 ± 19 W/K. There is a good agreement between the theoretical/calculated HLC value (107 W/K) and the performance gap for the whole dwelling accounts for 5%. The measured heat losses in the apartment are due to the external walls (51 ± 5% of the total), the glazing (30 ± 9% of the total), the “Others” part (11 ± 14% of the total), which comprises the losses through both infiltrations and thermal bridges and finally to the staircase (8 ± 3% of the total).

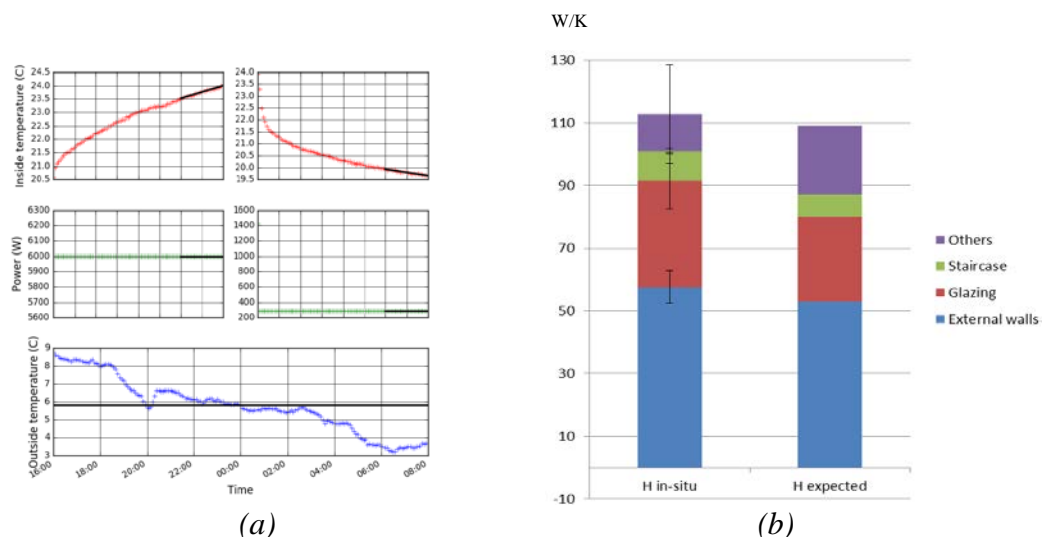


Figure 2. QUB measured parameters (a); comparison of measured/expected heat losses (b). MFH

When comparing the measured and expected heat losses (combination of elements' U-values and areas) through each component the measured values are found to be always larger. The only exception is represented by the *Others* element (sum of the heat losses through thermal bridges, ventilation, infiltration and not measure elements) for which larger losses were expected in practice due to natural infiltration and thermal bridging. Finally, it should be noted that the largest uncertainty belongs to *Others* that also includes the uncertainty on the heat gain from the bare water-heating pipes in the rooms which could not be determined precisely.

2.2.2 Single-family house

The structure of the external walls is as follows: wooden board, 16 cm of glass-wool insulation from the 80's, concrete, 8 cm of glass-wool insulation from the 60's then thin concrete. The ceiling is composed of: wood planks, 16 cm of rock wool insulation, wooden board, stone wool insulation. All windows have two simple glazings with a 5 cm air gap. The wooden floor has a crawling space (air gap) underneath of ca 20 cm.

The measured parameters during an overnight QUB/e test are reported in Figure 3(a) for the sake of clarity, whereas in Figure 3(b) the measured global HLC is shown to be 180 ± 4 W/K. There is a good agreement between the theoretical HLC value (206 W/K, estimated during inspection) and the measured one (14% difference). The measured heat losses are due to the windows ($33 \pm 2\%$ of the total), the *Others* part ($24 \pm 2\%$ of the total), the wooden floor ($19 \pm 6\%$ of the total), the external walls ($15 \pm 7\%$ of the total) and the ceiling ($8 \pm 3\%$ of the total).

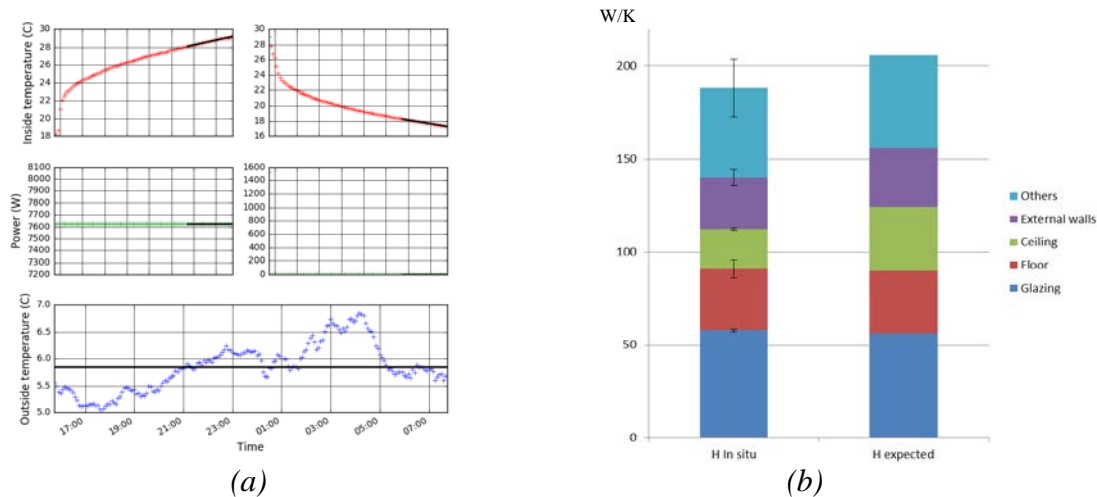


Figure 3. QUB measured parameters (a); comparison of measured/expected heat losses (b). SFH

When looking at Figure 3(b) we can see that the estimated heat losses (combination of elements' U-values and areas) are in well agreement with the expectations for most elements and there exists only a $4 \pm 32\%$ discrepancy between the expected and resulting thermal bridging and infiltrations losses. The largest discrepancies are attributable to the external walls and the ceiling which perform better than expected (detailed information of the structures was not fully available during the inspection). This can also be seen when comparing the U-values in Table 3:

Table 3. Measured and theoretical U value of each element; SFH.

Element	Measured U value [W/m ² /K]	Expected U value [W/m ² /K]	Discrepancy [W/m ² /K]	Area [m ²]
External walls	0.38 ± 0.2	0.6	-0.22 ± 0.2	53
Glazings	2.7 ± 0.2	2.5	-0.2 ± 0.2	22
Ceiling	0.26 ± 0.03	0.4	-0.14 ± 0.03	85
Ground floor	0.40 ± 0.11	0.4	0 ± 0.11	85

Finally, as for the MFH above it can be noticed that the heat losses through the neighbors' walls are not reported in the analysis. Such losses were indeed found to be negligible as the neighbor apartments were heated to nearly the same temperature of the measured SFH.

2.2.3 Discussion

The limited availability of information and the lack of routine performance diagnoses are a common feature in the Nordic countries where the control of efficiency is based on accreditation systems and energy inspections, as contemplated in the building codes. This is not only generating additional costs and inefficiencies through the entire design, construction and financing process, but is directly affecting consumers' decisions and undermines investor confidence. A positive example is Sweden that is home of two established measurement methods (i.e. the Energy Signature method and the SVEBY program) and is embracing the possibility of mandatory measurements for new buildings whereas in the Norwegian and Finnish 2010 building codes, measurements are still a voluntary alternative to energy performance evaluations.

Measurement is required to provide confidence for consumers and investors in a building's performance and can also be used to solve the liability issues that often arise after renovation (which makes for over 50% of the construction market in the Nordics and up to 70% in

Denmark).

3. Conclusion

In this work the presented results from two measurements carried out in a multi-family house and in a single-family house in Denmark showcase the use of the QUB/e method as an innovative tool to determine the discrepancy between theoretical and actual thermal performance of the building envelope and of its structures. The comparison with current quasi-steady-state methods pinpoints the advantages in terms of time and cost reduction and opens the possibility to effectively use the QUB/e method to solve potential liabilities issues and lower the risk for investors and insurers.

References

- [1] J. Laustsen, “Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings,” 2008.
- [2] D. Butler and A. Dengel, “Review of co-heating test methodologies,” 2013.
- [3] R. Jack, “Building Diagnostics : Practical Measurement of the Fabric Thermal Performance of Houses,” Loughborough University, 2015.
- [4] S. F. Stamp, “Assessing uncertainty in co-heating tests : Calibrating a whole building steady state heat loss measurement method,” University College of London, 2016.
- [5] E. Mangematin, G. Pandraud, and D. Roux, “Quick measurements of energy efficiency of buildings,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 13, no. 4, pp. 383–390, 2012.
- [6] I. O. for Standardization, “ISO 9869-1:2014 Thermal insulation – building elements – in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method,” Geneve (Switzerland), 2014.
- [7] J. Meulemans, F. Alzetto, D. Farmer, and C. Gorse, “QUB/e: A Novel Transient Experimental Method for in situ Measurements of the Thermal Performance of Building Fabrics,” *Int. SEEDS Conf. 2016 Sustain. Ecol. Eng. Des. Soc.*, no. September 2016, pp. 115–126, 2017.
- [8] G. Pandraud and R. Fitton, “QUB: Validation of a Rapid Energy Diagnosis Method for Buildings,” *Annex 58 Proc.*, 2013.
- [9] A. Janssens, “Overview of methods to analyse dynamic data. International Energy Agency, EBC Annex 58, Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements.,” Leuven: KULeuven., 2016.
- [10] J. Wingfield, D. Johnston, D. Miles-Shenton, and M. Bell, “Whole House Heat Loss Test Method (Coheating),” *Cent. Built Environ.*, 2010.

Mittauslaitteistojen soveltuvuus alipaineistettujen osastojen paineeron pysyvyyden seurantaan asbestipurkutöissä

Timo Jalonen
Delete Finland Oy

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli tutkia alipaineistettujen asbestipurkuosastojen mittauslaitteistoja ja -menetelmiä uuden asbestilainsäädännön vaatimusten mukaisesti. Kaikissa kolmessa tutkitussa laitteistoissa oli sama päätoimintaperiaate. Kaikki laitteistot toimivat parhaiten verkkovirralla, laitteiston osat sijoitetaan osaston ulkopuolelle, vain mittaletku johdetaan osaston sisäpuolelle. Laitteistot tallensivat kerätyn tiedon monin tavoin: muistitikulle, paperille, puskuriin tai pilveen. Säädöksissä määrätty hälytys on toteutettu eri tavalla kussakin laitteistossa. Kohteessa 1 tutkittiin kahta erillistä asiaa, osaston alipainetta sekä usean anturin yhtäaikaista mittauslukemia, arvot olivat välillä -6,2 Pa ja -9,3 Pa ja toisella jaksolla välillä -9,5 Pa ja -12,0 Pa. Kohteessa 2 tutkittiin osaston alipainetta sekä kolmen laitteiston samanaikaisia mittauslukemia. Mittausjakson ajan osasto oli selkeästi alipaineinen ja satunnaisella ajanhetkellä otettiin mittareiden lukemat. Kaikki lukemat olivat hyvin lähellä toisiaan, -8,1 Pa...-8,4 Pa. Vaativissa kohteissa pitää hyvin tarkasti suunnitella mittalaitteen mittayhteen (mittaletku) paikka alipaineistetussa asbestipurkuosastossa. Laitteistojen käyttöohjeisiin tulee tutustua erittäin tarkasti. Kaikille laitteistoille oli ominaista, että tiedon keruun, tallentamisen ja analysoinnin toimenpiteet olivat hyvin monivaiheisia. Tutkitut mittauslaitteistot täyttävät lait, asetukset ja niiden ohjeet hyvin.

1. Johdanto

Työn tavoitteena on tutkia alipaineistettujen asbestipurkuosastojen mittauslaitteistoja ja -menetelmiä uuden asbestilainsäädännön vaatimusten mukaisesti. Lainsäädännössä on määritetty asbestipurkuosastoille raja-arvot alipaineen määrälle ja pysyvyydelle. Lainsäädännön toteuttaminen ei ole täysin yksiselitteistä ja mittauslaitteiston asettelussa purkuosastoihin on tiettyjä erityispiirteitä. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää markkinoilla olevien mittaus-järjestelmien soveltuvuutta ja käytettävyyttä lain mukaisesti. Tavoitteena on havainnoida käytännön haasteita mittausjärjestelyn toteutuksessa. Tavoitteena on myös selvittää toimintamalleja, kun syntyy poikkeamia lain mukaisista määräyksistä. Poikkeamia aiheuttavat esimerkiksi tekniset viat ja inhimilliset virheet.

2. Työn tausta

Asbestitöihin liittyvä lainsäädäntö on korvattu uudella lailla (684/2015) eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaatimuksista ja valtioneuvoston asetuksella (798/2015) asbestityönturvallisuudesta [1], [2], [3] ja [4]. Lakiin on keskitetty asbestipurkutyölupaa ja asbestipurkutyöntekijän pätevyyttä koskevat säännökset sekä näistä pidettävien rekistereiden ylläpitoon liittyvät määräykset. Lisäksi asetuksella säädetään asbestityöhön liittyviä menettelyjä ja asbestipurku-työn suunnitelmien, menetelmien, työvälineiden sekä henkilösuojainten käyttöön liittyviä vaatimuksia. Lain ja asetuksen ohjeistus on julkaistu työsuojelun verkkopalvelun [www-sivustoilla](http://www.sivustoilla). Ohjeet on koonnut Rakennusalan Koordinaatioryhmä päiväyksellä 11.4.2017. Samassa osiossa on myös pdf-tiedosto

Usein kysytyjä kysymyksiä asbestista. Tämä asiakirja on päivitetty 12.1.2017 (tieto otettu 20.4.2017) ja sitä päivitetään säännöllisesti työsuojeluhallintoon tulleiden yhteydenottojen pohjalta.

2.1 Työsuojeluhallinto ja www.tyosuojelu.fi -sivusto

Työsuojeluviranomainen on jaettu aluehallintovirastossa viiteen työsuojelun vastuualueeseen. Työsuojelun vastuualueilla valvotaan alueellisesti työsuojelua koskevien säännösten ja määräyksien noudattamista. Valvonnan lisäksi virasto antaa ohjeita ja neuvoja työn terveyteen ja turvallisuuteen sekä työsuhteen ehtoihin liittyvissä kysymyksissä. Tyosuojelu.fi -sivusto on työsuojeluhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Verkkopalvelu on ryhmitelty seitsemään pääosioon eli palvelualueeseen mm. työsuhte, työolot, työtapaturvallisuus- ja terveys, harmaa talous. Asbestiin liittyviä asioita käsitellään rakennusalan alakohdassa, <http://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/rakennusala/asbesti>.

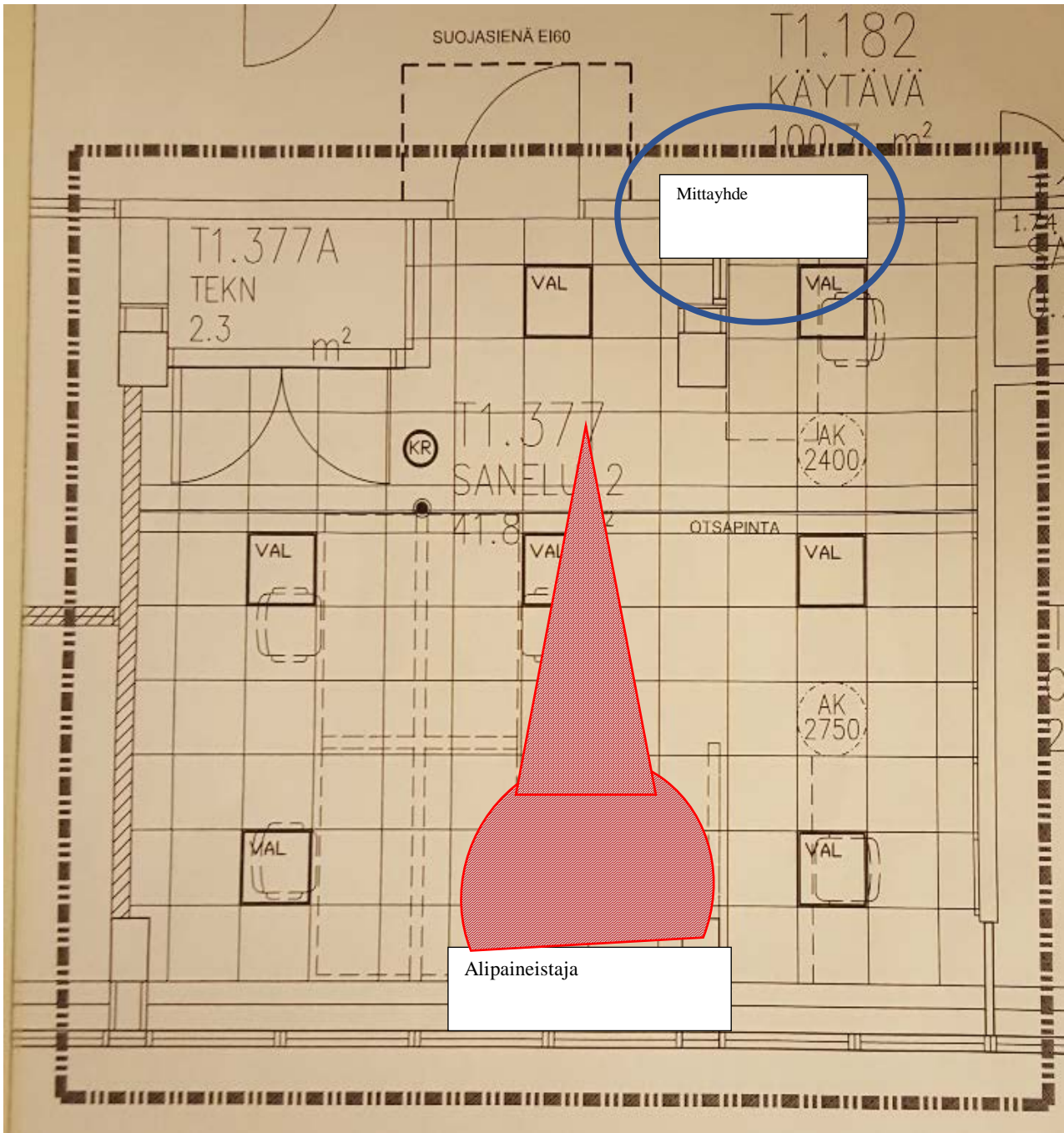
2.2 Oppaat ja ohjeistukset (kaupalliset toimijat)

Asbestilainsäädännön kehittyessä Suomessa, vuosina 1987 ja 1994 annettujen säädösten perusteella, kaupalliset toimijat ovat tuottaneet erinäisiä ohjeita yhteistyössä viranomaisten (aiemmin AVI) kanssa mm. tilaajille, urakoitsijoille ja tutkijoille. Ohjeistuksiin ja selvityksiin on saatu vaikutteita Ruotsin, Ison-Britannian ja Saksan vastaavista aineistoista. Suomessa ohjeiden laatimiseen on osallistuttu monialaisesti. Alan toimijat mm. alipaineistuslaitteiden valmistajat, suodatinvalmistajat, purkutyöurakoitsijat, koulutuskeskukset, poliittiset toimijat ja lainsäädännön edustajat ovat tehneet moninaista yhteistyötä. Oheisessa oppaassa korostetaan ”Hiljainen tieto” - käsitettä, mikä viittaa kokeneen kentän ääneen [5].

Tavallisenkin rakennustyön pölynhallinta on kehittynyt näiden lainsäädäntöjen ohella esim. Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta [6]. Tällä hetkellä viranomaisohjeita tuotetaan aluehallintovirasto yhtenä toimialueenaan: ”selvittää vakavien työtapaturvallisuuden, ammattitautien ja työperäisten sairauksien syitä sekä toimia niiden ehkäisemiseksi”.

3. Tutkimuskohteet, mittausjärjestelyt ja -tulokset

Kohteina käytettiin Delete Finland Oy:n urakoimia asbestipurkutyömaita Uudellamaalla. Kaikissa kolmessa laitteistossa oli sama päätoimintaperiaate. Kaikki laitteistot toimivat parhaiten verkkovirralla. Laitteiston osat sijoitettiin osaston ulkopuolelle, vain mittaletku johdettiin osaston sisäpuolelle. Laitteistot tallensivat kerätyn tiedon monin tavoin: muistitikulle, paperille, puskuriin tai pilveen. Kussakin laitteessa oli kaksi tapaa tallentaa kerätty data. Säädöksissä määrätty hälytyskin on toteutettu eri tavalla kussakin laitteistossa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin laitteistojen asentamista ja ominaisuuksia säädösten kannalta eikä varsinaisesti, kuinka absoluuttisesti ”oikeat” lukemat ovat laitteistoissa. Tärkeä yksittäinen osa mittausprosessia on mittausletkun (eli mittayhteen, kuva 1) sijoittaminen osastoon, sekä letkun liikkumisen ja turhan heilunnan estäminen ilmavirrassa.



Kuva 1. Suositeltu mittayhteen sijoittelu tutkimuskohteen osastossa, ympyrä (kielletty alue raidoitettu).

3.1 Kohde 1 ja yhtäaikainen mittaus usealla identtisellä mittarilla

Kohde 1 valikoitui symmetrisen muotonsa johdosta. Kohteessa 1 tutkittiin kahta erillistä asiaa, osaston alipainetta sekä usean anturin yhtäaikaisia mittauslukemia. Tila oli pinta-alaltaan noin 42 m². Tilan alkuperäiset rakenteelliset seinät toimivat myös asbestiosastoinnin seininä. Huoneen oven tilalle asennettiin kolmiosainen kulcutunneli. Kohteeseen 1 asennettiin mittausjärjestelmäksi laitteisto III, johon kytkettiin 7 identtistä mittalaitetta. Yleisesti asetusten ja ohjeiden mukaan osastoon kytketään vain yksi mittalaitte. Tarkoituksena oli havainnoida yksittäisten mittalaitteiden ominaisuuksia, kun ne otetaan sattumanvaraisesti varastosta käyttöön. Mittalaitteet on kalibroitu valmistajien ohjeiden mukaisesti, yleensä vuosittain tai useammin. Kohteessa 1. laitteiston III

mittayhteet sijoitettiin oletetulle, hyvälle (kuva 1), mittaussyöhykkeelle. Oletettu hyvä vyöhyke virtausteknisesti oli alipaineistajaa nähden vastakkaisella seinällä eri korkeuksissa.

3.2 Kohde 2 ja kolme eri laitteistoa samanaikaisesti

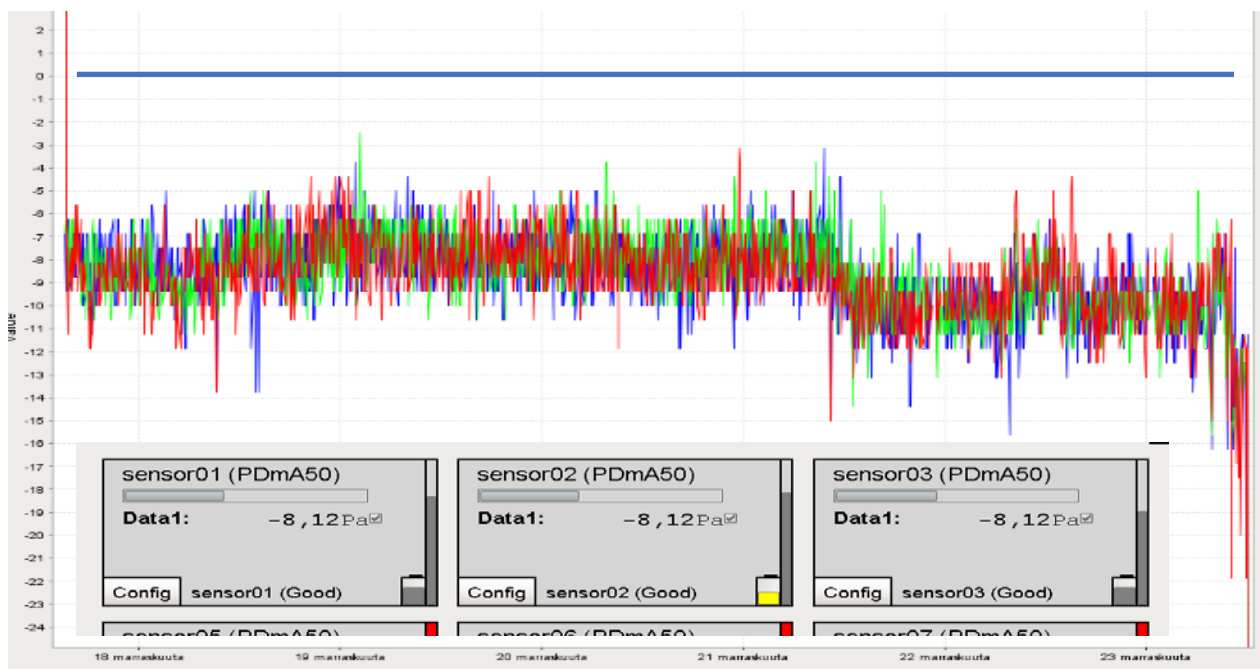
Kohteessa 2 asennettiin kolme laitteistoa mittaamaan asbestipurkutyön aikaista alipaineistusta. Laitteistot asennettiin kooltaan ja muodoltaan hyvin haasteelliseen osastoon. Laitteistot sijaitsivat osaston alkupäässä kolmiosaisen sulkutunnelin lähistöllä.

3.3 Mittaustulokset, kohde 1

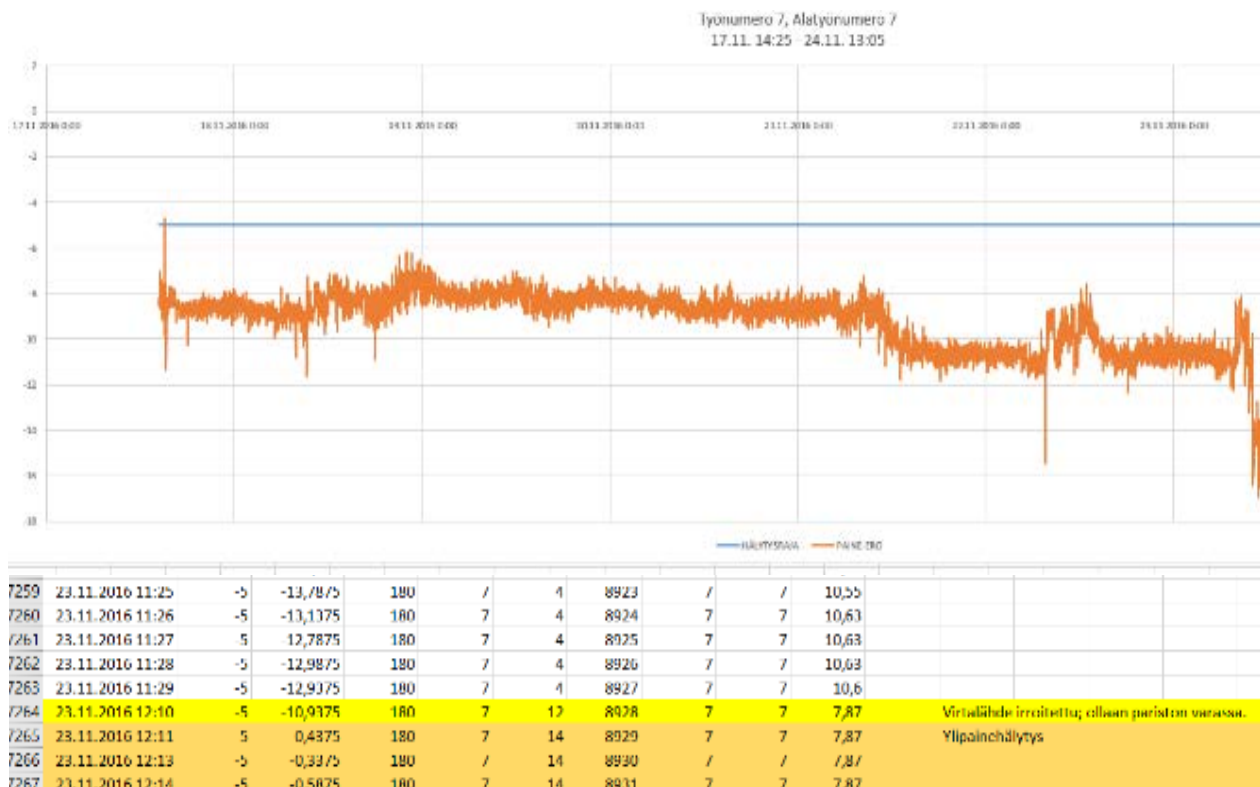
Asbestipurkutyön kesto oli noin kolme vuorokautta, mittaustulokset ovat ajalta 9.11–11.11.2016. Mittausjakson puolivälissä alipaineistajan suodatin vaihdettiin. Ensimmäisellä jaksolla ennen suodattimen puhdistusta arvot olivat välillä -6,2 Pa ja -9,3 Pa ja toisella jaksolla uusilla suodattimilla välillä -9,5 Pa ja -12,0 Pa. Paine-erolähettimien mittayhteet (7 kpl mittaletkuja) asennettiin eri paikkoihin. Kaikkien seitsemän laitteiston käyrät olivat hyvin lähellä toisiaan. Vaihteluvälit olivat trendi-käyristä luettavissa seuraavasti: osiossa yksi 6,2–9,2 Pa -> +/- 1,5 Pa ja osiossa kaksi (suodatinvaihdon jälkeen) 9,5–12 Pa -> +/- 1,25 Pa.

3.4 Mittaustulokset, kohde 2

Kohteessa kaksi tutkittiin osaston alipainetta sekä kolmen laitteiston (I, II ja III) samanaikaisia mittaustuloksia. Asbestipurkutyö kesti useita viikkoja, mittaustulokset ovat ajalta 17.–24.11.2016. Mittausjakson ajan osasto oli selkeästi alipaineinen ja täytti lain ja asetusten määräykset selvästi. Kuvissa 2 ja 3 on mittaustulosten kuvaajia. Satunnaisella ajanhetkellä otettiin mittareiden lukemat (19.11.16 klo 13:24). Kaikki lukemat olivat hyvin lähellä toisiaan, -8,1...-8,4 Pa.



Kuva 1. Laitteiston mittaustuloksia. Y-akselilla paine-ero (Pa), vaajaviivalla on osoitettu asteikon nollakohta.



Kuva 2. Laitteiston mittausdataa. Y-akselilla paine-ero (Pa), vaakaviivalla on osoitettu asteikon -5 Pa arvo.

3.5 Havainnot laitteistoista mittausten aikana

Mittauslaitteistot täyttävät lait, asetukset ja niiden ohjeet hyvin, koska tulosten tulkinta on yksiselitteistä. Jokaisella kolmella laitteistolla on kuitenkin omat erityispiirteensä. Laitteistojen käyttöohjeisiin tulee tutustua erittäin tarkasti. Kaikille laitteistoille on ominaista, että tiedon keruun, tallentamisen ja analysoinnin toimenpiteet ovat hyvin monivaiheisia. Laitteistojen mittaletkut (mittayhteet) on toteutettu keskenään identtisesti. Tärkeää on niiden asettaminen edustavasti osaston sisälle ja niiden puhtaudesta huolehtiminen. Muutenkin on noudatettava laitevalmistajien ohjeissa esitettyjä huolto- ja kalibrointiohjeita. Kaikilla laitteistoilla lain vaatimat tallenteet saa hyvin asiakkaalle toimitettavaan sekä arkistoitavaan muotoon.

4. Johtopäätökset

Laissa ja asetuksissa mainitaan, että osasto on alipaineistettava vähintään viiden ja krokidoliittia purettaessa vähintään kymmenen pascalin paine-erolla. Painotan itse, että laissa käytetään termiä vähintään. Opinnäytetyön mittausten perusteella arvioin, että osastoinnin alkaessa on hyvä pyrkiä saamaan kaksinkertaiset paine-eroarvot säädöksissä mainittuihin. Paine-eron määrän alenemiseen vaikuttavat esim. alipaineistajien suodattimien likaantuminen, tavaroiden sekä jätteiden kuljettaminen kolmiosaisen sulkutunnelin läpi, vauriot osaston seinässä ja mahdolliset häiriöt alipaineistajassa.

5. Yhteenveto

Isona haasteena kyseisissä tutkimuksissa on saada käyttöön soveltuvat urakointikohteet. Kohteet ja mittauslaitteet täyttivät suunnitelmien mukaiset kriteerit ja lopputuloksena sain tarvittavat tiedot.

Toinen iso haaste on lain ja asetusten teksti, joka on monitahoista ja vaatii tutustumista. Lainsäädännön tueksi viranomaiset ovat tehneet ohjeita, jotka löytyvät eri tahoilta. Mittausjärjestelyjen ja laitteistojen haasteet korostuvat moninaisissa kohteissa. Silloin pitää hyvin tarkasti suunnitella mittalaitteen mittayhteen (mittaletkun) paikka alipaineistetussa asbestipurkuosastossa. Kuvassa 1 on havainnollistettu hyvä mittayhteen paikka osastossa suhteessa alipaineistuslaitteeseen. Mittauslaitteistojen väliset erot sekä mittauksen valvonnan monivaiheisuus korostavat oikean käytön tärkeyttä. Laitteistojen käyttöohjeisiin tulee siis tutustua erittäin tarkasti. Kaikille laitteistoille on ominaista, että tiedon keruun, tallentamisen ja analysoinnin toimenpiteet ovat hyvin monivaiheisia. Tutkitut mittauslaitteistot täyttävät lait, asetukset ja niiden ohjeet hyvin, koska tulosten tulkinta on yksiselitteistä.

Laitteistojen muodostamat, lain vaatimat tallenteet tulevat kaikista testatuista laitteistoista selkeinä mittausjakson kuvaajina. Kuvaajien tuottaminen ja arkistointi vaativat asbestipurkutyön urakoitsijalta uudenlaista osaamista.

Mahdolliset laiterikot, työtaturmat ja sairaskohtaukset aiheuttavat purkuuunnitelmien mukaiset hätätilamenettelyt. Alipaineseurantalaitteiston hälytyksen jälkeen ongelma korjataan välittömästi. Lyhytaikaiset alipainerajan alitukset eivät aiheuta merkittäviä toimenpiteitä. Selkeät pidempiaikaiset poikkeamat (esim. sähkökatko) selvitetään raportoinnin yhteydessä.

Lähdeluettelo

- [1] Laki eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaatimuksista (684/2015)
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150684>.
- [2] Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015)
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150798>.
- [3] Ohje asbestipurkutyötä koskevan lain soveltamiseksi, Rakennusalan Koordinaatioryhmä 11.4.2017
http://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/126482/Ohje_asbestipurkutyota_koskevan_lain_soveltamiseksi/.
- [4] Ohje asbestityön turvallisuutta koskevan asetuksen soveltamiseksi, Rakennusalan Koordinaatioryhmä 11.4.2017
http://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/126482/Ohje_asbestityon_turvallisuutta_koskevan_asetuksen_soveltamiseksi/.
- [5] Asbesti- ja haitta-ainesaneerauksen käsikirja 1.16, koonnut Aaro Seppälä, Espoo 2016
- [6] Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009)
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090205>,
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090205>.

Uusi menetelmä rakennusten vuotoilmavirtojen määrittämiseksi

Ilpo Kulmala¹ ja Pertti Pasanen²

¹ VTT Oy

² University of Eastern Finland

Tiivistelmä

Rakennusten hallitsemattomat ilmavuodot vaipan yli lisäävät energiankulutusta ja heikentävät sisäilman laatua ulkoilman epäpuhtauksien kulkeutuessa sisäilmaan. Vuotojen tarkka määrittäminen on vaikeaa varsinkin suurissa rakennuksissa. Vuotojen mittaamiseksi koneellisella ilmanvaihdolla varustetuissa rakennuksissa on kehitetty uudenlainen menetelmä, joka koostuu laskentamallista ja mitatuista ulkoilman, suodatetun tuloilman ja poistoilman hiukkaspitoisuuksista. Mitattujen hiukkaspitoisuuksien perusteella voidaan vuotoilmavirran suuruus päätellä yhdistämällä kokeellisesti saatu tieto teoreettisesti laskettuihin arvoihin. Menetelmää kokeiltiin kenttämittaushetkellä neljän kuukauden mittausjakson aikana. Tulokset osoittavat, että vuotoilmavirrat voitiin määrittellä luotettavasti esitetyn menetelmän avulla ja että vuotoilmavirrat ovat selvästi riippuvaisia sääolosuhteista.

1. Johdanto

Hallitsemattomat ilmanvuodot rakennuksen vaipan kautta voivat vaikuttaa merkittävästi energiankulutukseen. Lisäksi sisään kulkeutuva ulkoilma tuo mukanaan epäpuhtauksia jotka heikentävät sisäilman laatua. Hiukkasmaiset epäpuhtaudet tunkeutuvat vuotoreittien kautta vaihtelevasti hiukkaskoosta riippuen, kun taas kaasumaiset epäpuhtaudet läpäisevät yleensä rakenteet suodattumatta. Vuodot ovat tärkeitä myös turvallisuuden näkökulmasta, koska niiden kautta myrkyllisten tai vaarallisten aineiden ulkoilmapäästöt voivat kulkeutua sisätiloihin altistaen rakennuksessa olevat ihmiset.

Rakennusten ilmatiivyyden mittaamiseksi on olemassa standardoituja menetelmiä, jotka perustuvat rakennuksen paineistamiseen ja vuotojen mittaukseen erillisen puhaltimen aikaansaaman paine-eron avulla [1]. Vuotoilmavirran suuruus referenssipaine-erolla (tavallisesti 50 Pa) antaa hyödyllisen ja vertailukelpoisen tuloksen rakennusten suhteellisesta ilmatiivyydestä. Mittaustulokset voidaan periaatteessa muuntaa vuotoilmavirroiksi edellyttäen, että rakennuselementtien ominaisuudet, sääolosuhteet ja muut tekijät ovat tunnettuja. Käytännössä on kuitenkin lähes mahdotonta saada tietoja kaikista näistä parametreista ja siksi yksinkertaistettuja malleja on kehitetty vuotoilmanvaihtokertoimen laskemiseksi [2]. Yksinkertaistamista koskevien oletusten vuoksi nämä mallit eivät välttämättä tarjoa luotettavaa kuvaa yksittäisestä rakennusten käyttäytymisestä.

Paineistukseen perustuva menetelmä sopii helpoiten pientalojen tiiveysmittaukseen. Suurten tilojen vuotojen mittaus on huomattavasti haasteellisempaa ja vaatii mm. huomattavan suuren puhaltimen vuotomittauksissa tarvittavien riittävien ilmavirtojen tuottamiseksi.

2. Uusi vuotomittausmenetelmä

Uusi menetelmä perustuu vuotoilmavirtojen dynaamiseen määrittämiseen yhdistämällä mitattu sisäilman hiukkaspitoisuus laskettujen pitoisuuksien kanssa. Menetelmän avulla voidaan määrittää vuotoilmavirrat asettamalla laskentamallin antamat tulokset vastaamaan mittaustuloksia.

2.1 Laskentamalli

Olettaen, että tarkasteltava pitoisuus on tasan jakaantunut sisätiloissa, voidaan koneellisella ilmanvaihdon varustetun rakennuksen sisäilman hiukkaspitoisuus esittää muodossa

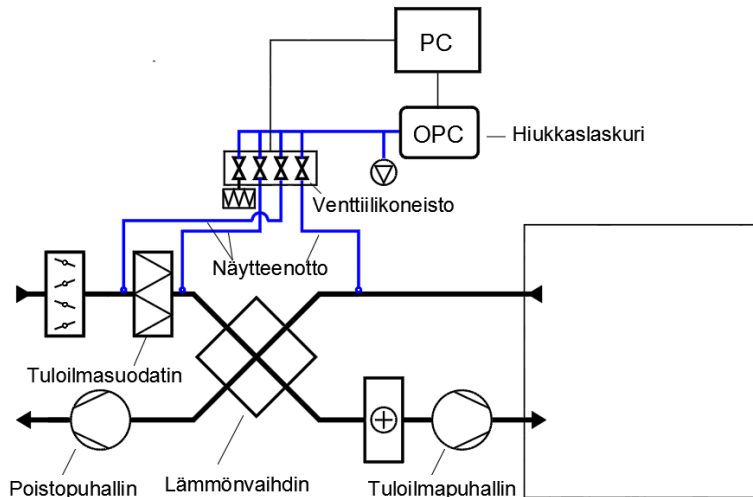
$$VdC(t, d) = [q_{INF}PC_{OA}(t, d) + qC_{OA}(t, d)(1 - E) - qC(t, d) - q_{EXF}C(t, d) - kVC(t, d)] \cdot dt \quad (1)$$

- missä
- V = rakennuksen tilavuus (m^3)
 - $C(t, d)$ = sisäilman ajasta ja partikkelikoosta riippuva hiukkaspitoisuus (kpl/m^3)
 - q_{INF} = vuotoilmavirta rakennuksen sisälle (m^3/s)
 - P = hiukkasten koosta riippuva tunkeutumistehokkuus rakennuksen vaipan läpi
 - C_{OA} = ulkoilman ajasta ja partikkelikoosta riippuva hiukkaspitoisuus (kpl/m^3)
 - q = koneellisen ilmanvaihdon ilmavirta (m^3/s)
 - E = tuloilmasuodattimen hiukkaserotusaste partikkelikoosta riippuen
 - q_{EXF} = vuotoilmavirta rakennuksesta ulos (m^3/s)
 - k = hiukkasten depositionopeus rakennuksen sisällä ($1/s$)

Yhtälön (1) avulla voidaan sisäilman hiukkaspitoisuus periaatteessa ratkaista analyttisesti, jos ulkoilman hiukkaspitoisuus tunnetaan ajan funktiona. Käytännössä tämä vaihtelee kuitenkin satunnaisesti, joten ratkaisu on mahdollista yleisessä tapauksessa vain numeerisesti. Tätä varten tarvitaan tietoa ajasta riippuvasta ulkoilmapitoisuudesta, mikä on mahdollista saada selville mittaamalla.

2.2 Mittausjärjestelmä

Ilman hiukkaspitoisuuksien mittaamiseksi rakennettiin mittausjärjestelmä, joka koostuu jatkuvatoimisesta hiukkaslaskurista, venttiilikoneistosta ja tietokoneesta. Tietokone ohjaa järjestelmää ja tallentaa mittaustulokset (kuva 1). Mittausjärjestelmä asennettiin Helsingissä sijaitsevan toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneelle ja sen avulla mitattiin jatkuvasti ilman hiukkaspitoisuutta ulkoilmasta sekä tuloilmasta suodatuksen jälkeen. Näiden avulla laskettiin tuloilmasuodattimen erotusaste. Lisäksi hiukkaspitoisuutta mitattiin poistoilmasta, mikä edustaa hyvin rakennuksen keskimääräistä sisäilman pitoisuutta. Mittaukset tehtiin optisella hiukkaslaskurilla (Met One 237) ja tallennettiin tietokoneelle. Mitatut hiukkaskoot olivat 0,3–5 mikrometriä jaettuna viiteen alueeseen. Tulokset tallennettiin 2 minuutin välein.



Kuva 1. Mittausjärjestelmän periaate.

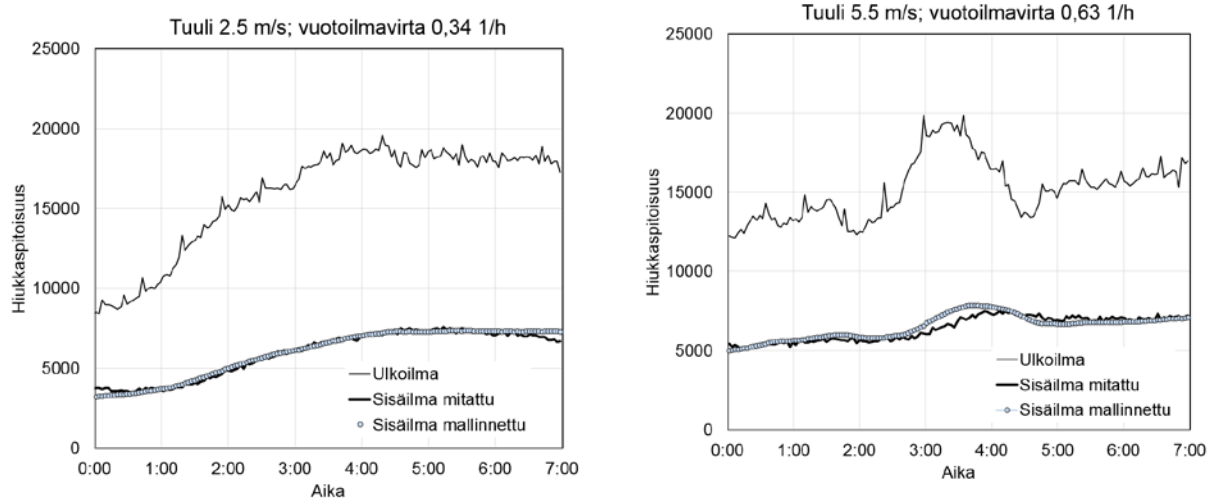
3. Vuotoilmavirtojen määrittäminen

Mitattuja ulkoilman hiukkaspitoisuuksia käytettiin lähtöarvoina yhtälössä (1). Muut tuntemattomat tekijät eli läpäisy P arvioitiin Mosley ym.[3] esittämän yhtälön avulla ja depositio k puolestaan Riley ym. [4] kokeellisten arvojen perusteella. Tuloilmasuodattimen erotusaste E laskettiin mitatuista hiukkaspitoisuuksista. Ilmanvaihdon oletettiin olevan tasapainossa, jolloin vuotoilmavirrat sisään ja ulos ovat yhtäsuuret: $q_{INF} = q_{EXF}$.

Vuotoilmavirrat määritettiin sovittamalla mitatut ja lasketut hiukkaspitoisuudet toisiinsa pienimmän neliösumman menetelmällä. Esimerkki mitatuista ja mallinnetuista hiukkaspitoisuuksista on esitetty kuvassa 2. Sovitukset on tehty vuorokauden alussa tilanteessa jossa rakennuksessa ei ole sisäisiä päästölähteitä, jotka vaikuttavat sisäilman pitoisuuksiin. Kuten kuvasta 2 nähdään, mallinnetut hiukkaspitoisuudet kuvaavat hyvin mitattuja pitoisuuksia. Lisäksi mallinnetut ja mitatut sisäilman hiukkaspitoisuudet vaihtelivat selvästi ulkoilmapitoisuudesta riippuen. Sääolosuhteiden, lähinnä tuulen vaikutus näkyi mittauksissa selvästi siten että tuulen nopeuden kasvaessa lisääntyi myös vuotoilmavirta. Vuotoilmavirrat vaihtelivat mittausjakson aikana välillä 0,2 ja 2,2 vaihtoa tunnissa keskimääräisen vuotoilmanvaihtuvuuden ollessa 0,43 1/h.

Menetelmän avulla voitiin mittaukset tehdä ilmanvaihdon konehuoneessa häiritsemättä rakennuksen normaalia toimintaa. Tämä on huomattava etu: menetelmässä ei tarvita erillisten puhaltimien asentamista ovi- tai ikkuna-aukkoihin eikä aktiivista mittausta. Jatkuvatoimisen mittauksen avulla voidaan myös saada tietoa rakennuksen toimivuudesta erilaisissa olosuhteissa mikä auttaa ymmärtämään paremmin ilmiöiden dynamiikkaa. Mittauksissa ei myöskään tarvita erillistä merkkiainetta vaan siinä käytetään hyväksi ulkoilman pienhiukkasia, joita kaupunkiympäristössä on aina vähintäänkin riittävästi.

Tuloksia voidaan hyödyntää määrittettäessä rakennusten suojaustehokkuuksia ulkoilmassa esiintyviä myrkyllisiä tai haitallisia aineita vastaan sekä tilanteissa joissa rakennusten suojausta halutaan parantaa.



Kuva 2. Määritetyt vuotoilmavirrat kahdessa eri tapauksessa: keskimääräinen tuulen nopeus 2.5 m/s, vuotoilmanvaihtuvuus 0.34 1/h (vasen kuva) ja 5.5 m/s jolloin vuotoilmanvaihtuvuus oli 0.63 1/h (oikea kuva). Tarkasteltu hiukkaskokoalue 0.3-0.5 μm .

4. Yhteenveto

Koneellisella ilmanvaihdolla varustetun toimistorakennuksen vuotoilmavirrat määritettiin yksinkertaisen mutta luotettavan laskentamallin sekä mitattujen hiukkaspitoisuuksien avulla. Sovittamalla mitatut ja lasketut hiukkaspitoisuudet toisiinsa saatiin vuotoilmavirta luotettavasti määritettyä. Menetelmän etuna on, että verrattain yksinkertaisilla mittausjärjestelyillä voidaan suurtenkin tilojen keskimääräinen vuotoilmavirta määrittää luotettavasti. Tulokset osoittavat, että mittaukset ovat toistettavia ja että sääolosuhteiden vaikutus vuotoilmavirtoihin nähtiin selvästi. Menetelmän avulla voidaan määrittää rakennusten suojaustehokkuuksia ulkoilman epäpuhtauksia vastaan aiempaa tarkemmin, mistä on apua, mikäli suojaustehoa halutaan parantaa.

Kiitokset

PANDHUB hanke.(Prevention and Management of High Threat Pathogen Incidents in Transport Hubs) on saanut rahoitusta Euroopan Unionin seitsemännestä puiteohjelmasta sopimuksella no. 607433.

Lähdeluettelo

- [1] ISO 9972:2015. 2017. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method.
- [2] Jokisalo, J., J. Kurnitski, M. Korpi, T. Kalamees, and J. Vinha. 2009. Building Leakage, Infiltration, and Energy Performance Analyses for Finnish Detached Houses. *Building and Environment* 44: 377–87.
- [3] Mosley, R., D.J. Greenwell, L.E. Sparks, Z. Guo, W.G. Tucker, R. Fortmann, C. Whitfield (2001). Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Sci. Technol.*, 34, 127–136.
- [4] Riley, W. J., T. E. McKone, A. C. K. Lai, and W. W. Nazaroff. 2002. Indoor Particulate Matter of Outdoor Origin: Importance of Size-Dependent Removal Mechanisms.” *Environmental Science and Technology* 36: 200–207.

B3. Materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet

Lämpötilan vaikutus eristemateriaalien lämmönjohtavuuteen

Hanna Kianta
ThermiSol Oy

Tiivistelmä

Lämmöneristemateriaalien eristävyys perustuu pääasiassa eristeen sisällä olevaan paikallaan seisovaan ilmaan tai muuhun kaasuun. Lämpötilan muutos vaikuttaa eri kaasujen lämmönjohtavuuteen eri tavoin, minkä seurauksena materiaalit saattavat käyttäytyä eri lämpötiloissa toisin kuin yleensä laskennassa käytettävät arvot antavat olettaa.

1. Johdanto

Lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuteen liittyvät mittaukset suoritetaan +10 °C keskilämpötilassa. Lämmöneristemateriaalien ominaisuudet kuitenkin vaihtelevat lämpötilasta riippuen. Tutkimuksessa on selvitetty lämmöneristämässä tyypillisesti käytettyjen eristemateriaalien lämmönjohtavuutta -30 °C ja +30 °C lämpötilojen välillä. Artikkelin perustuu Hanna Kiannan diplomityöhön.

2. Lämpö

Termodynamiikassa lämmöllä tarkoitetaan lämpötilojen vaikutuksesta johtuvaa energian siirtymistä paikasta toiseen. Lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan, jolloin rakenteeseen syntyy lämpövirta Φ . Lämpövirran tiheyttä merkitään tunnuksella q . Lämpövirran suuruus määritetään eri lämmön siirtymismuodoilla tapahtuvien lämpövirran tiheyksien ja läpäisevän rakenteen pinta-alan A avulla.

$$\Phi = q \cdot A \quad (1)$$

2.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämpö siirtyy rakenteissa johtumalla, konvektiossa tai säteilyssä. Tyypillisesti materiaaleilla, joilla on pieni lämmönjohtavuus, kuten eristemateriaaleilla, lämmönjohtavuus on yhdistelmä näistä kolmesta siirtymismuodosta. [1]

Johtumista tapahtuu aineessa, kun siinä olevat lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan. Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys ajasta riippumattomassa yksiulotteisessa tilanteessa on

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{d} \quad (2)$$

missä λ = lämmönjohtavuus (W/(m·K))
 ΔT = lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä (°C)
 d = ainekerroksen paksuus (m)

Paikallaan seisovassa ilmassa johtumista tapahtuu hyvin vähän ja tämän vuoksi monen lämmöneristeen eristävyys perustuu ilmaan. [2]

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollinen konvektio aiheutuu lämpötilaerojen aiheuttamista kaasun tiheyseroista ja painovoimasta. Esimerkiksi keveillä ja pehmeillä mineraalivilloilla eristetyissä rakenteissa esiintyy luonnollista konvektiota, kun rakenteen sisäpinta on lämmin, jolloin ilma nousee ylöspäin ja rakenteen ulkopinnassa ilma liikkuu alaspäin. Nämä yhdessä aiheuttavat lämmöneristävyttä heikentävän kierron eristekerroksessa, jos sitä ei rakenteellisesti huomioida. Pakotettu konvektio johtuu esimerkiksi tuulen tai ilmanvaihdon aiheuttamasta paine-erosta, jolloin ilma kulkee rakenteen epätiiviyiskohtien läpi.

Kolmas lämmön siirtymismuoto on säteily. Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen mukana. Säteilemällä tapahtuvaan lämmön siirtymiseen ei tarvita väliainetta vaan se on tehokkainta tyhjiössä. Kaikki absoluuttisen nolapisteen yläpuolella olevat kappaleet lähettävät (emittoivat) säteilyä. Säteilyn osuessa kappaleen pintaan osa siitä heijastuu pois ja osa absorboituu (sitoutuu) kappaleen pintaan.

2.2 Lämmönjohtavuus

Aineen lämmönjohtavuutta kuvaava arvo λ kertoo miten paljon materiaalin läpi voi siirtyä lämpöä eri siirtymismuodoilla. Se kuvaa lämpövirran tiheyttä pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen raekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen [3]. Aineen lämmönjohtavuus on sitä pienempi, mitä tehokkaampi eriste on kyseessä.

Materiaaleille ilmoitettu lämmönjohtavuuden arvo mitataan tyypillisesti +10 °C lämpötilassa. Lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuden mittaamiseen käytetään yleisimmin lämpövirtalevylaitetta tai kuumalevylaitetta. Kummassakin laitteessa tutkittavan näytteen pintojen välille aiheutetaan lämpötila ero, jonka seurauksena näytteen läpi kulkee lämpövirta, jonka suuruuden perusteella laite määrittää eristeen lämmönjohtavuuden.

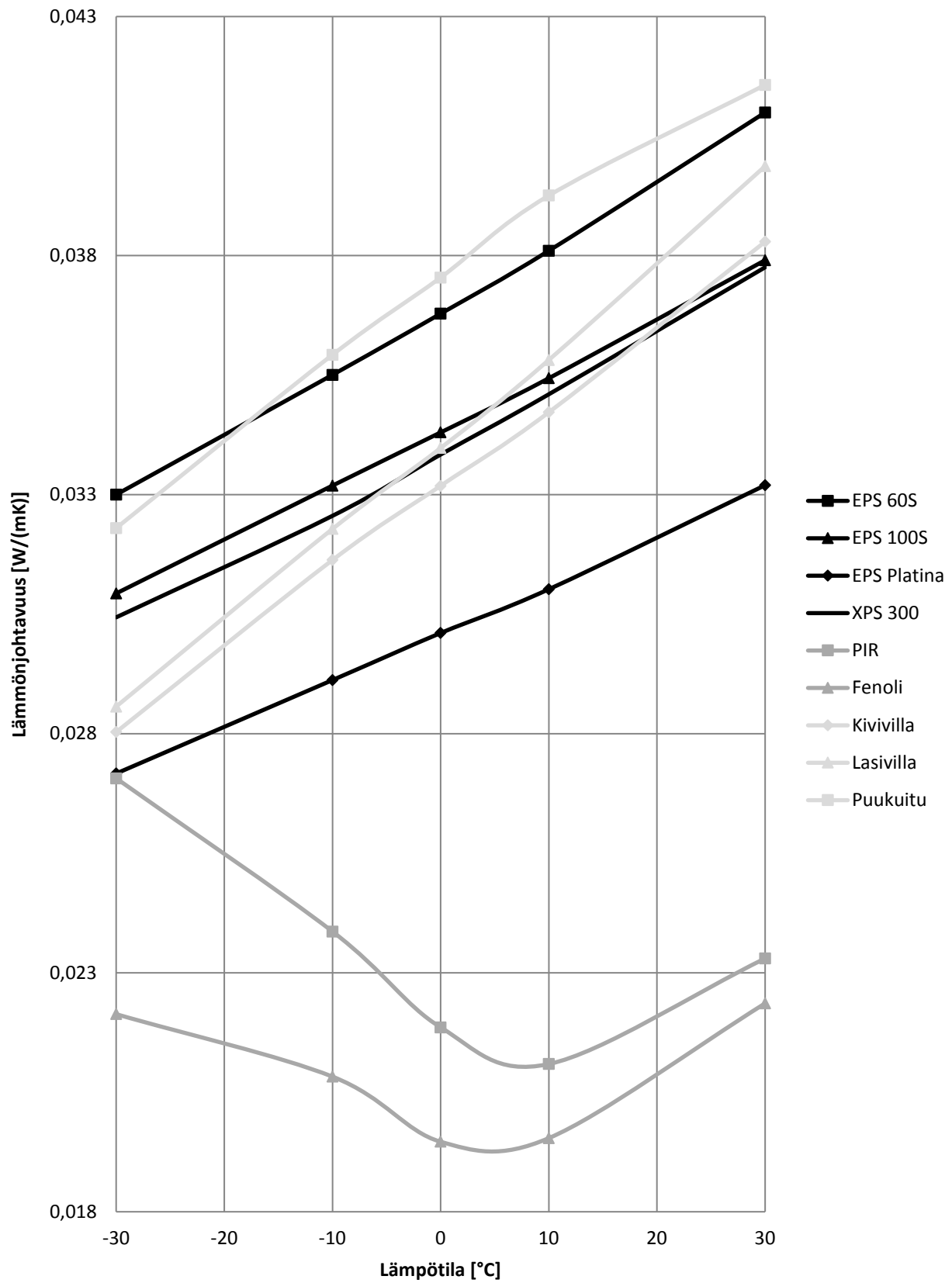
3. Lämpötilan vaikutus lämmönjohtavuuteen

Diplomityössä selvitettiin tyypillisesti Suomessa käytettävien lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuksia. Mittauksissa tutkittiin EPS-, XPS-, PIR-, fenoli-, kivivilla-, lasivilla- ja puukuitueristeitä. Kaikkien tutkittavien eristeiden tilavuudesta suuri osa on ilmaa tai kaasua sisältäviä soluja, minkä vuoksi eristävän kaasun ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi lämmöneristeen eristävytyteen. Tutkimuksen mittaukset tehtiin -30 °C, -10 °C, 0 °C +10 °C ja +30 °C lämpötiloissa. Mittauksissa ei simuloitu eristeissä mahdollisesti olevaa kosteutta, joka saattaa tiivistyessään vaikuttaa lämmönjohtavuusominaisuuksiin.

Mittaukset -30 °C lämpötilassa tehtiin Ranskassa, Laboratoire National d'Essai -laboratoriossa suojatulla kahden näytteen kuumalevylaitteella. Loput mittaukset tehtiin ThermiSol Oy:n laboratoriossa FOX 314 -lämpövirtalevylaitteella. Molemmissa mittalaitteissa näytelevyjen läpi aiheutettiin lämpövirta käyttäen 20 °C lämpötilaeroa.

Tutkittavista eristeistä EPS-, kivivilla-, lasivilla- ja puukuitueristeiden lämmöneristävyys perustuu eristeen sisällä paikallaan olevaan ilmaan. XPS-eristeessä solujen sisällä on hiilidioksidiä [4], jolla on hieman ilmaa paremmat lämmöneristävyysominaisuudet [5]. PIR- ja fenolieristeissä käytettävä kaasu on tyypillisimmin pentaania [6,7].

Mittaustulosten yhteenveto



Kuva 1. Lämpötilan vaikutus lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuteen.

Kuvassa 1 on eri materiaaleille mitatut lämmönjohtavuudet eri lämpötiloissa. Keskenään samankaltaisten lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuusominaisuudet muuttuvat melko samalla tavalla. Tästä syystä mittaustulokset on ryhmitelty kuvaajaan erivärisiin ryhmiin: polystyreenieristeet (EPS ja XPS), pentaania sisältävät eristeet (PIR ja fenoli), sekä kolmantena ryhmänä villat ja puukuitueristeet.

Ilmaa ja hiilidioksidia sisältävien eristeiden lämmönjohtavuus muuttui mitta-alueella lineaarisesti kasvaen lämpötilan noustessa. Hiilidioksidia sisältävän XPS-eristeen lämmönjohtavuuden kasvu oli hieman ilmaa sisältäviä eristeitä nopeampaa.

Pentaania sisältävien PIR- ja fenolieristeiden lämmönjohtavuuskäyttäytyminen eroaa kylmissä lämpötiloissa merkittävästi hiilidioksidia ja ilmaa sisältävien eristeiden käyttäytymisestä, sillä eristeen lämmönjohtavuus heikkenee kylmissä lämpötiloissa. Kaasuille on tyypillistä, että niiden saavuttaessa saturaatiopisteensä ja kaasujen tiivistyessä nesteeksi, niiden lämmönjohtavuus alkaa suurentua [5]. Mittaustuloksista voidaan päätellä, että pentaanin tiivistymislämpötila eristeessä on noin +5 °C.

PIR-eristeen lämmönjohtavuus heikkenee -30 °C mennessä niin merkittävästi, että harmaan EPS Platina -eristeen lämmönjohtavuus saavuttaa PIR-eristeen -eristeen lämmönjohtavuuden. Harmaan EPS:n lämmönjohtavuus +10 °C lämpötilassa oli mittausten mukaan 0,031 W/(m·K) ja -30 °C lämpötilassa 0,027 W/(m·K). Myös kivi- ja lasivillan mitatut lämmönjohtavuusarvot -30 °C lämpötilassa olivat hyvin lähellä PIR-eristeen lämmönjohtavuutta.

Käytännössä mineraalivillaeristettyjen rakenteiden lämmönjohtavuutta heikentää rakenteessa tapahtuva konvektio. Konvektio vaikuttaa lämmöneristävyysarvoihin yli 125 mm paksuissa mineraalivilla- ja puukuitueristetyissä rakenteissa. [3]

3.1 Laskentaesimerkki

Rakenteiden energiatehokkuutta määritettäessä käytetään U-arvoa. Myös U-arvon laskenta perustuu mittaustuloksiin +10 °C lämpötilassa. Laskentaesimerkissä on määritetty eristepaksuus, jolla valittu seinärakenne täyttää U-arvon 0,17 W/(m²K) +10 °C lämpötilassa ja tutkittu lämpötilan ja lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutusta U-arvoon.

Tarkasteltava rakenne on pakkasvarastorakentamisessa tyypillisesti käytetty teräsohultlevypintainen muovieriste-elementti, jonka ytimenä käytetään EPS 100S- tai PIR-eristeitä. Rakenteen sisä- ja ulkopinnassa oleva pelti on ohut ja sen lämmönjohtavuus on eristeytimen lämmönjohtavuuteen verrattuna suuri, minkä vuoksi sen lämmönvastuksen oletetaan olevan 0 (m²K)/W.

Laskenta tehdään -20 °C, 0 °C, +10 °C ja +20 °C lämpötiloissa käyttäen tutkimuksessa saatuja mittaustuloksia. Laskentapisteen valintaan vaikutti, että eristeiden käyttäytymistä ei tunneta mitta-alueen ulkopuolella. Valituissa lämpötiloissa voidaan EPS-eristeillä käyttää saatuja mittaustuloksia tai niiden keskiarvoja.

PIR-eristeellä lämmönjohtavuus laskee lineaarisesti -30 °C ja -10 °C välillä sekä kasvaa lineaarisesti +10 °C ja +30 °C välillä. Laskennassa käytetyt arvot ovat siis -20 °C ja +20 °C lämpötiloissa mittaustulosten keskiarvoja. PIR-eristeen lämmönjohtavuus on epälineaarinen -10 °C ja +20 °C välillä. Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuudet näissä lämpötiloissa on arvioitu olettamalla, että lämmönjohtavuus on lineaarinen -10 °C ja 0 °C välillä ja 0 °C ja +10 °C välillä

ja laskettu näissä mittauspisteissä saatujen tulosten keskiarvojen perusteella arvio lämmönjohtavuudeksi 0 °C ja +10 °C lämpötiloissa.

Tutkittava eristepaksuus EPS-eristeisellä elementillä on 200 mm ja PIR-eristetyllä elementillä 125 mm. Taulukossa 1 on laskennan tulokset, mikä olisi seinärakenteen U-arvo eri lämpötiloissa, kun käytetään valittua eristepaksuutta.

Taulukko 1. Rakenteen U-arvo eri lämpötiloissa.

	-20°C	0°C	10°C	20°C
U_{EPS} [W/(m ² K)]	0,15	0,16	0,17	0,18
U_{PIR} [W/(m ² K)]	0,20	0,17	0,17	0,17

Laskennasta havaitaan, että EPS-eristetyllä rakenteilla U-arvo paranee -20 °C lämpötilassa ja vastaavasti heikkenee +20 °C lämpötilassa lähtötilanteeseen verrattuna. PIR-eristetyn rakenteen U-arvo sen sijaan pysyy vakiona korkeammissa lämpötiloissa, mutta kasvaa huomattavasti kylmässä.

Käytännössä rakenteiden U-arvojen laskennassa tulisi huomioida U-arvon korjauskertoimet, kuten kiinnikkeistä aiheutuneet kylmäsilat. Laskennassa on myös tehty oletus, että pintavastukset ovat lämpötilasta riippumattomia vakioita.

3.2 Lämmönjohtavuuden muutoksen vaikutus käytännössä

Lämmönjohtavuuden muutos ilmiönä on merkittävä etenkin kylmien rakenteiden ominaisuuksia laskettaessa. Eristeiden ominaisuuksien tuntemisella saadaan hyödynnettyä eristeiden ominaisuudet tehokkaasti ja samalla toisaalta vähennettyä rakenteisiin liittyviä kosteus- ja jäätymisriskejä.

Taulukkoon 3 on laskettu, mikä olisi eristepaksuus kussakin lämpötilassa, jos rakenteen U-arvo olisi 0,17 W/(m²K). Erityisesti huomioitavaa on, että EPS-rakenteessa eristepaksuus valitulla U-arvolla on jopa 15 mm ohuempi kuin laskennallinen arvo +10 °C lämpötilassa. Toisaalta PIR-eristeisen rakenteen tapauksessa esimerkiksi pakkasvaraston seinärakenteen tulisi olla noin 20 mm paksumpi, jotta saavutetaan sama U-arvo kuin +10 °C lämpötilassa.

Taulukko 2. Eristepaksuus eri lämpötiloissa U-arvon ollessa 0,17 W/(m²K).

	-20°C	0°C	10°C	20°C
d_{EPS} [mm]	185	195	200	210
d_{PIR} [mm]	145	125	125	125

Eristeillä, jotka muuttuvat tehokkaammiksi kylmissä lämpötiloissa, voidaan saavuttaa säästöä eristepaksuudessa ja laiteinvestoinneissa tai vastaavasti lämmitys- ja jäähdytyskustannuksissa pitkän ajan kuluessa. Niillä myös eristeen kosteustekniseen toimintaan saadaan lisävarmuutta, koska kastepiste siirtyy kylmissä olosuhteissa ulommas.

4. Yhteenveto

Ilmaan perustuvien lämmöneristeiden lämmönjohtavuus kasvaa lineaarisesti lämmönjohtavuuden noustessa. Tästä syystä eristeiden lämpötilakäyttäytyminen on ennustettavissa ja niiden lämpöteknisen toimivuuden ja esimerkiksi kastepisteen sijainnin määrittäminen on yksinkertaista. Pentaania sisältävien eristeiden lämmönjohtavuuden vaihtelu ei ole lineaarista, eikä sen myötä

yhtä hyvin ennustettavissa, joten eristeiden toiminnan arviointi ja mallintaminen on hankalampaa. Joka tapauksessa pentaania sisältävien lämmöneristeiden eristävyys heikkenee kylmissä lämpötiloissa jopa niin paljon, että ilmaa sisältävien eristeiden eristävyysominaisuudet saavuttavat pentaania sisältävien eristeiden lämmönjohtavuusarvon. Lämmöneristeiden ominaisuuksien nykyistä tehokkaammalla hyödyntämisellä voitaisiin saada hyötyjä rakennusten energiankulutusta ja rakennuskustannuksia ajatellen. Toisaalta eristeiden ominaisuuksien tuntemuksella saadaan myös vähennettyä riskejä rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN 12667. 2001. Rakennusmateriaalien ja –tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevyllä. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- [2] Young, H. ja Freedman, L. 2008. University Physics with Modern Physics. Pearson. 1608 s.
- [3] Siikanen, U. 2015. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy. 256 s.
- [4] RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1. 2014. RIL. 500 s.
- [5] Lienhard IV, J. ja Lienhard V, J. 2011. A Heat Transfer Textbook. 4th edition. Dover Publications, Inc. 723 s.
- [6] Eaves, D. 2004. Rigid Polyurethane Foams in Handbook of Polymer Foams (ed. Eaves, D.). Rapra Technology Limited. 23 s.
- [7] Cornick, M. 2010. Foam in Phenolic Resins: A Century of Progress (ed. Pilato, L.). Springer. 19 s.

Rakennuseristemateriaalien kosteuskäyttäytyminen ja hyvät rakennustavat

Hannu-Petteri Mattila
Paroc Group Oy

Tiivistelmä

Rakennuseristemateriaalien kosteuskäyttäytymistä arvioitiin kokeellisella laboratoriotutkimuksella. Tutkimuksessa oli mukana kivi- ja lasivilla-, EPS-, PIR-, fenolivaahto- sekä sellueristeitä, ja siinä mitattiin niiden kosteudensitominaisuuksia eri mekanismeilla, sekä alkuperäisten materiaaliominaisuuksien palautumista kuivumisen jälkeen. Kaikki tutkitut eristemateriaalit sitovat itseensä vettä joutuessaan kosteudelle alttiiksi, vaikkakin niiden kostumis- ja kuivumiskyvyssä on huomattavia eroja. Eristeisiin sitoutunut kosteus aiheuttaa aina jonkinasteista haittaa sekä materiaalien lämmöneristyskyvylle että ympäröiville rakenteille. Kuivaketjun katkeamattomuudesta tulee huolehtia rakennusmateriaalien asianmukaisen suojauksen avulla, sekä varmistamalla rakennekosteuden poistuminen suunnittelemalla rakenteet ulospäin kuivuviksi. Esimerkiksi betonirakenteiden kuivumista voidaan nopeuttaa käyttämällä diffuusioavoimia rakennuseristemateriaaleja. Tiiviillä höyrynsululla taas ehkäistään tehokkaasti rakennuksen käytönaikaista vesihöyryn siirtymistä sisäilmasta rakenteisiin diffuusion avulla. Vaurioilanteissa kastuneet rakennusmateriaalit tulee aina kuivattaa tai vaihtaa materiaalista riippumatta.

1. Johdanto

Viime vuosina on kiinnitetty erityistä huomiota rakentamisen aikaiseen kosteudenhallintaan rakennustyömailla sekä myös rakenteiden käytännön kosteusominaisuuksiin pidemmällä aikavälillä. VTT Expert Services Oy:llä teetettiin vuosien 2016–2017 aikana laaja kokeellinen tutkimus eristemateriaalien kosteuskäyttäytymisestä [1]. Vertailututkimuksessa oli mukana kivi- ja lasivilla-, EPS-, PIR-, fenolivaahto- sekä sellueristeitä, ja siinä mitattiin materiaalien hygroskooppisia ominaisuuksia, vedenimeytymistä osittaisupotuksessa, vedenimeytymistä diffuusiolla sekä kapillaarisesti, sekä myös tiettyjä lämmöneristävyteen liittyviä ominaisuuksia. Myös kostuneiden koekappaleiden kuivumista seurattiin. Suoritetut laboratoriomittaukset vastaavat periaatteellisesti materiaalien kostumista ja kuivumista erilaisissa käytännön tilanteissa.

Kosteus voi siirtyä eristemateriaaleihin tai eristetilaan esimerkiksi vesihöyrynä, nestemäisenä vetenä, tai kiinteässä olomuodossa lumena. Koska ilma sisältää aina vesihöyryä, ilman liikkeet eristetilassa siirtävät myös vettä. Asianmukaisen höyrynsulun käyttäminen rakenteen sisäpinnassa estää kosteudensiirron sisäilmasta eristetilaan. Ulkopuolelta eristekerrosta suojaavat vesikate ja ulkoverhous. Hygroskooppiset materiaalit sitovat kosteutta myös ulkoilmasta, joka on aina kosketuksissa eristetilaan. Vesihöyryn liikkeen ymmärtäminen on olennaista höyryn kondensoitumiskäyttäytymisen ymmärtämiseksi ja hallitsemattoman kondensoitumisen estämiseksi [2]. Nestemäisen veden kanssa eristeet voivat joutua kosketuksiin esimerkiksi rakennusaikana sateen ja betonivalun yhteydessä tai myöhemmin erilaisten rakennusvaurioiden/-virheiden seurauksena. Myös lunta saattaa päätyä tuulen mukana eristetilaan. Kosteuden kertymistä rakenteisiin voidaan estää rakennusmateriaalien asianmukaisella suojaamisella sekä varmistamalla sitoutuneen rakennekosteuden kuivuminen suunnittelemalla rakenteet ulospäin kuivuviksi.

2. Tutkitut materiaalit

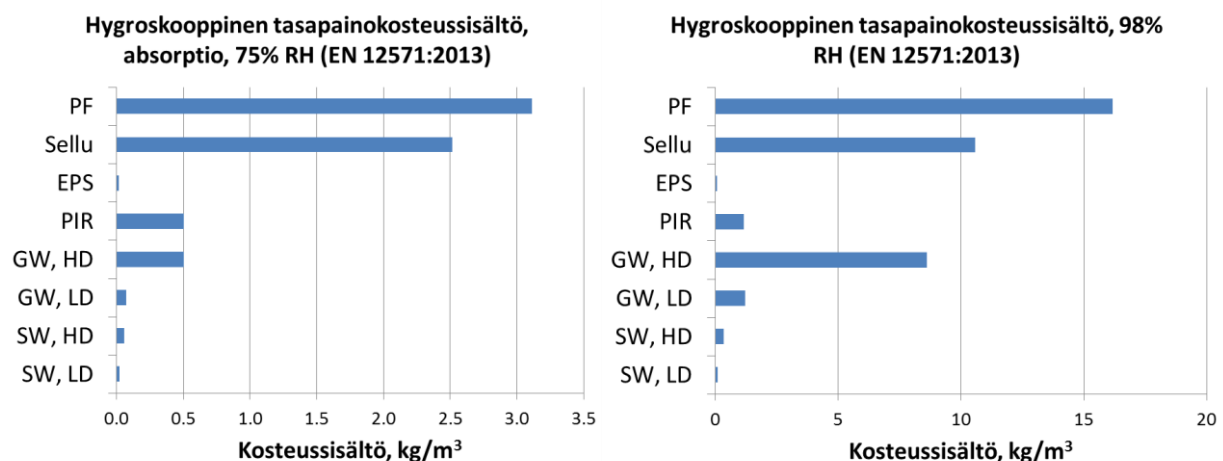
Taulukko 1. Materiaaliominaisuuksia [1].

Materiaali	Lyhenne	Tiheys, mitattu (kg/m ³)	Lämmönjohtavuus, 10 °C, mitattu (mW/(m*K))
Kivivilla, kevyt	SW, LD	30	36
Kivivilla, tiheä	SW, HD	94	35
Lasivilla, kevyt	GW, LD	14	36
Lasivilla, tiheä	GW, HD	71	35
PIR	PIR	31	21
EPS	EPS	15	31
Selluloosaeristelevy	Sellu	38	40
Fenolivahto	PF	37	19

VTT:n tutkimuksessa käytettyjen materiaalien yleisominaisuuksia on listattu Taulukossa 1. Kaikki tässä artikkelissa esitetyt tulokset ovat sellaisenaan päteviä ainoastaan testatuille materiaaleille, ja tuloksia analysoitaessa on otettava huomioon, että materiaalityyppien sisälläkin ominaisuuksissa voi olla eroavaisuuksia.

3. Eristeisiin ilmasta sitoutuva kokonaiskosteus ja sen vaikutukset

Rakennustuotteiden ilmasta sitomaa kosteutta voidaan arvioida standardin EN ISO 12571 mukaisesti määritetyissä tasapainotiloissa (suhteellinen kosteus, lämpötila). Tällöin mitataan ns. sorptiokäyrästä, joka kuvaa kosteuspitoisuuksia sekä absorptio- että desorptiotilanteissa, toisin sanoen tasapainotilan muuttuessa kuivasta kostempaan sekä päinvastoin. Kuva 1 esittää eri materiaalien tasapainokosteuksia 75 % (absorptio) ja 98 % suhteellisessa kosteudessa 23 °C lämpötilassa mitattuna [1]. Mittaustulokset vastaavat tilanteita, joissa eristemateriaalit ovat alttiina ilmankosteudelle, mutta eivät kosketuksissa nestemäiseen veteen. Suomen olosuhteissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaihtelee kesäajan 60–70 prosentista talvikuukausien noin 90 prosenttiin. Kuvasta 1 on siis luettavissa eristemateriaaleihin sitoutuvan kosteuden määrä kostumisen alkuvaiheessa, sekä erittäin korkeassa suhteellisessa kosteudessa.



Kuva 1. Materiaalien tasapainokosteussisältöjä, laskettu raportin [1] mittaustulosten pohjalta.

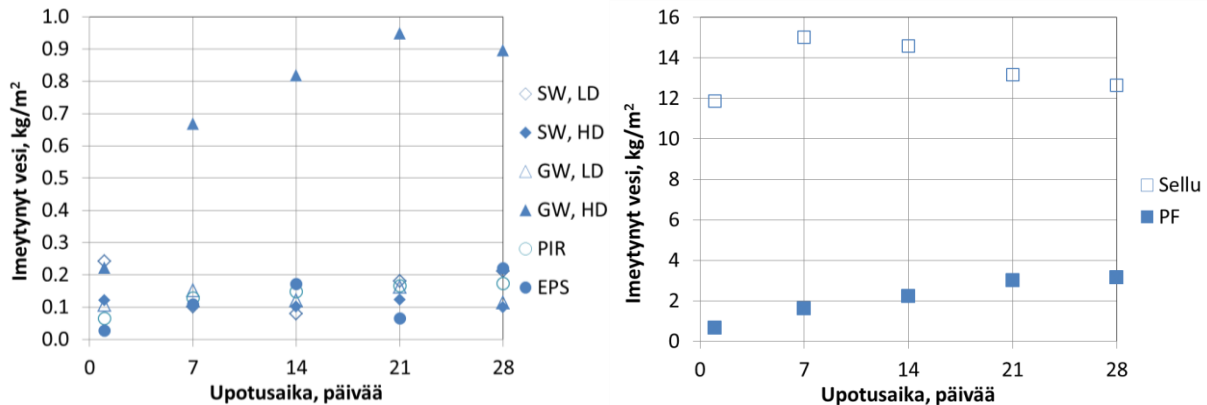
Tutkittujen materiaalien välillä on suuria eroja. Erojen merkitystä analysoitaessa tulee muistaa, että lämmöneristeen perustehtävä rakenteessa on rakenteen lämmönjohtavuuden pienentäminen. Suuret määrät sitoutunutta kosteutta heikentävät eristeiden lämmöneristyskykyä. Esimerkiksi sellueristeiden osalta kirjallisuudessa [3, 4] mainitaan mitatun noin 1.5 % nousu

lämmönjohtavuudessa jokaista kosteusprosenttia kohden. Myös biologinen aktiivisuus sekä rakenteiden korroosioriski lisääntyvät materiaalien kosteussisällön kasvaessa.

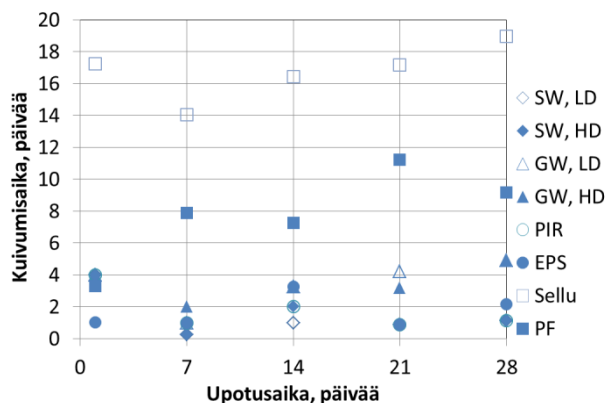
4. Eristeiden kastuminen ja kuivuminen ajan funktiona

4.1 Osittaisupotus (EN 12087)

Vedenimeytyminen eristeisiin osittaisupotuksella kuvantaa tilannetta, jossa esimerkiksi eristepaketti tai tasakatolle asennettu eriste kastuu sateessa.



Kuva 2. Vedenimeytyminen eristemateriaaleihin osittaisupotuksessa (EN 12087, metodi 1) ajan funktiona [1].



Kuva 3. Näytekappaleiden kuivumisaika osittaisupotustestin jälkeen ajan funktiona [1].

Tutkittujen eristemateriaalien välillä on merkittäviä eroja sekä imeytyvässä vesimäärässä (Kuva 2) että kuivumisajassa takaisin alkukosteuteen (Kuva 3). Rakenteeltaan täysin avohuokoisissa kivi- ja lasivillassa vesi täyttää kuiturakenteen nopeasti, eli imeytyneen veden määrä ei tiheää lasivillaa lukuun ottamatta lisääny enää seitsemän päivän jälkeen. Muovieristeistä PIR ja EPS käyttäytyvät käytännössä samalla tavalla mineraalivillaeristeiden kanssa; ne imevät kosteutta jonkin verran hitaammin, mutta kuitenkin suunnilleen vastaavia määriä (kivivilla, kevyt lasivilla, PIR ja EPS $<0,3 \text{ kg/m}^2$, tiheä lasivilla $<1 \text{ kg/m}^2$). Fenolivaaho- ja sellueristeet keräävät kosteutta huomattavasti muita enemmän (fenolivaaho jopa 3 kg/m^2 ja sellueriste jopa 15 kg/m^2). Fenolivaahdon tapauksessa mittaustulokset viittaavat siihen, ettei 28 päivän testausaika ollut riittävä, vaan vedenimeytyminen saattaa edelleen jatkua. Testi tulisikin fenolivaahdon osalta uusia pidemmällä testausajalla.

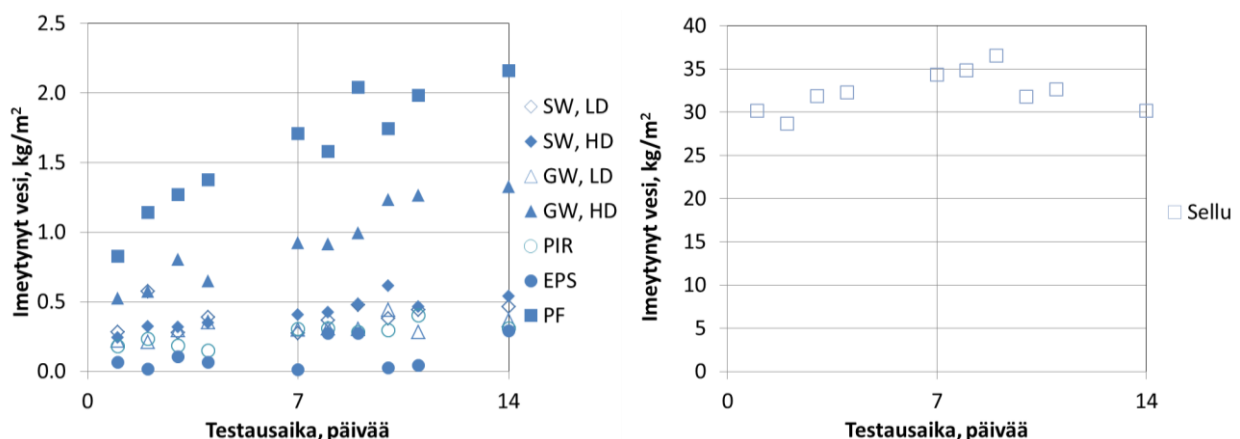
Neljän viikon upotustestin jälkeen kivivilla, PIR ja EPS olivat $+23 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa ja 50 %

suhteellisessa kosteudessa kuivatettuina kuivia 1-2 vuorokaudessa ja lasivilla 5 vuorokaudessa. Fenolivaahdon kuivumisaika oli noin 9 päivää, kun taas sellueristeellä kuivuminen kesti 19 päivää. Umpinaisissa rakenteissa mitattujen aikaerojen merkitys todennäköisesti kasvaa.

Materiaalien lämmönjohtavuus mitattiin sekä ennen että jälkeen osittaisupotustestien. Mittaustarkkuuden rajoissa saatiin kaikilla materiaaleilla alkuperäistä vastaava tulos myös upotustestien jälkeen. Eristeiden lämmöneristyskyky siis palautuu alkuperäiselle tasolle, mikäli materiaalit pääsevät kuivumaan vapaasti ja riittävän pitkään. Materiaalien mittapysyvyyttä arvioitiin vertaamalla testikappaleiden pituuden, leveyden ja paksuuden prosentuaalisia muutoksia 28 päivän osittaisupotustestin jälkeen. Mitatut leveys- ja pituusmuutokset olivat $\leq \pm 1.0$ % ($\leq \pm 4.0$ mm). Paksuuden osalta muutokset olivat alle ± 2.4 % ($\leq \pm 2.1$ mm). Ainoastaan sellueriste (-1.6 %) ja PIR (-0.7 %) kutistuivat upotustestissä paksuussuuntaan. Eristemateriaalin kutistuminen voi heikentää rakenteiden lämmöneristystä luomalla ilmarakojen eristetilaan.

4.2 Kapillaarinen vedenimeytyminen (EN 480-5)

Vedenimeytyminen eristeisiin kapillaarisesti saattaa olla merkittävä kostumismekanismi lähinnä maanvastaisissa rakenteissa, joissa kaikkia testattuja materiaaleja ei käytetä. Kuvassa 4 esitetään kuitenkin mittaustulokset kaikille materiaaleille. Ominaisuutta tutkittiin erityisesti kapillaarisen vedenimeytymisen mittaamiseen kehitetyllä mittaamenetelmällä, vaikka edellisessä luvussa esitetty osittaisupotusmenetelmä mittaa osin vastaavia ominaisuuksia. Eristemateriaalien keskinäinen järjestys imeytyneen veden määrällä verrattuna onkin näissä testeissä sama (Kuvat 2 ja 4). EPS-eriste imee vähiten vettä, mutta tiheää lasivillaa, fenolivaahtoa sekä sellueristettä lukuun ottamatta muut materiaalit ovat lähes samalla tasolla. Tuloksissa huomionarvoista on, että fenolivaahtoeristeitä markkinoidaan myös lattiarakenteisiin, vaikka niihin tämänkin mittauksen perusteella imeytyy merkittäviä määriä kosteutta. Tulosten pohjalta EPS, tiheä kivivilla sekä PIR soveltuvat tällä kriteerillä arvioituna parhaiten sovelluksiin, joissa kapillaarista vedenimeytymistä saattaa tapahtua.

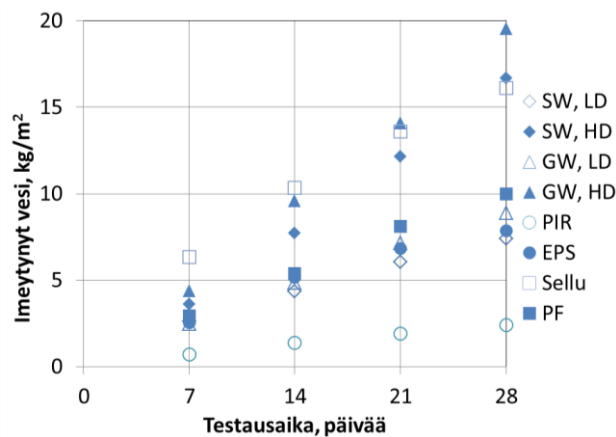


Kuva 4. Kapillaarinen vedenimeytyminen eristemateriaaleihin (EN 480-5) ajan funktiona [1].

4.3 Vesihöyryn diffuusio (EN 12088)

Sisäilman vesihöyryn osapaine on yleensä suurempi kuin ulkoilman vesihöyryn osapaine, joten diffuusio siirtää sisäilman kosteutta paineen vaikutuksesta sisätiloista ulos rakenteiden läpi. Tiivis höyrynsulku rakenteen sisäpinnassa estää tehokkaasti vesihöyryn siirtymisen diffuusiolla rakenteeseen. Standardin EN 12088 mukaisessa testissä osapaine-erojen aiheuttamaa vesihöyryn kulkeutumista eristemateriaaleihin simuloidaan testikappaleen ylitse lämmitetyn vesialtaan avulla

ylläpidettävällä 50 °C lämpötilaerolla.



Kuva 5. Vedenimeytyminen eristemateriaaleihin diffuusiolla (EN 12088) ajan funktiona [1].

Diffuusion vaikutuksesta vesihöyryä kulkeutuu vähiten suljetun huokosrakenteen PIR-eristeeseen. EPS-eriste, kevyet lasi- ja kivivilla, sekä fenolivaahtoeriste ovat keskenään suunnilleen samalla tasolla. Tiheisiin lasi- ja kivivilloihin sekä sellueristeeseen kosteutta siirtyy diffuusiolla eniten. 28 päivän mittausjakson aikana sitoutuneen veden määrä kasvoi lineaarisesti ajan funktiona kaikilla materiaaleilla. Vaikka tutkimuksessa ei mitattu materiaalien diffuusiovastuskertoimia (μ), tulokset ovat loogisessa järjestyksessä verrattaessa materiaalien taulukkoarvoihin [5]. Diffuusioavoimet materiaalit, kuten mineraalivillat ($\mu \approx 1$) ovat selvästi eri tasolla kuin PIR ($\mu = 160\text{--}2000$), ja muut tutkitut materiaalit sijoittuvat näiden välille.

5. Mittaustulosten käytännön merkityksestä

5.1 Rakennusaikaiset käytännöt

Yllä esitetyt mittaustulokset korostavat rakennusaikaisen kosteudenhallinnan merkitystä. Kaikki testatut eristemateriaalit imevät itseensä kosteutta useilla eri mekanismeilla. Esimerkiksi, mikäli eristepakkauksia ei rakennustyömaalla suojata sateelta, tai mikäli jo asennettujen eristeiden annetaan olla sateelle alttiina pitkiä aikoja, voi rakennekosteus nousta tarpeettomasti verrattuna kunnollisen sääsuojauksen käyttöön. Eristemateriaalien tehdaspakkauksia ei lähtökohtaisesti ole suunniteltu kestäämään pitkäaikaista kosteusrasitusta, vaan ne toimivat lähinnä mekaanisena suojana kuljetusten aikana.

5.2 Rakenteiden kuivuminen ja kosteustasapaino

On tärkeää, että rakennusmateriaalien sisältämä rakennusaikainen kosteus pääsee kuivumaan mahdollisimman hyvin ja nopeasti. Rakennusaikaista kosteutta on väistämättä aina mm. betonirakenteissa, joiden kuivumisesta voidaan edesauttaa mm. käyttämällä diffuusioavoimia eristemateriaaleja [6,7]. Nopeammalla betonin kuivumisella voidaan myös periaatteessa lyhentää rakennusaikaa, sillä rakenteet voidaan pinnoittaa aikaisemmin lisäämättä kosteusvaurioiden riskiä.

Rakenteiden kosteusturvallisuuden kannalta on olennaista tarkastella yleensä suuremman absoluuttisen kosteusmäärän sisältävää sisäilmaa. Sisäilman vesihöyryn osapaine on useimmiten suurempi kuin ulkoilman vesihöyryn osapaine, joten diffuusio siirtää sisäilman kosteutta rakenteessa sisältä ulos. Suurin vaikutus diffuusiossa on sisäseinälevyn materiaalilla, joka voi

periaatteessa tasoittaa huonetilan kosteusvaihteluita. Tiiviillä höyrysululla estetään kosteuden haitallinen siirtyminen eristeisiin ja muihin vaipparakenteisiin.

Rakennuseristeiden tehtävä ei ole tasapainottaa rakennusten kosteusolosuhteita. Ensinnäkin, merkittävän vaikutuksen saamiseksi eristemateriaalien tulisi käytännössä olla suorassa yhteydessä sisäilmaan [8], mutta lisäkosteus aiheuttaa lisäksi aina jonkinasteista haittaa lämmöneristeen suorituskyvylle ja ympäröiville rakenteille.

5.3 Vauriotilanteet

Rakennusten vauriotilanteissa, esimerkiksi putkien vuotaessa tai kattovaurion yhteydessä, rakenteisiin päätyvät vesimäärät ovat usein paikallisesti hyvinkin suuria. Kun otetaan huomioon edellä esitetyt tulokset, niin voidaan yleisellä tasolla todeta että usein rakenteiden kuivumiseen kuluva aika saattaa muodostua hyvinkin pitkäksi. Tämän johdosta vauriotilanteissa on lähtökohtaisesti syytä turvautua laajempiin korjauksiin ja vaihtaa kastuneet materiaalit.

6. Yhteenveto

Vettä sitoutuu eri mekanismeilla kaikkiin eristemateriaaleihin, mikäli ne joutuvat kosteudelle alttiiksi. Eri eristeiden kosteudensitomis- sekä kuivumiskyvyssä on huomattavia eroja. Rakennusten kosteusturvallisuuden takaamiseksi on tärkeää taata kuivaketjun katkeamattomuus rakennusaikana materiaalista riippumatta. Rakennuksen vesikaton ja ulkoseinien uloimpien kerrosten tulee muodostaa riittävä sääsuoja eristeille ja kantaville rakenteille. Avohuokoisten eristeiden käyttö edesauttaa rakennusaikaisen kosteuden poistumista lisäten rakenteiden turvallisuutta ja lyhentäen rakennusaikoja. Vauriotilanteissa kastuneet rakenteet vaativat pitkäaikaisvaikutusten ehkäisemiseksi eristemateriaalista riippumatta laajempia korjauksia.

Lähdeluettelo

- [1] Hyttinen, H. ja Seppälä, T. 2017. Test report VTT-S-01758-17 (12.4.2017): Moisture in building insulations. Determination of effect of moisture to the technical properties of building insulations. Espoo, VTT Expert Services Ltd.
- [2] University of Kentucky. 2010. Insulation fact sheet: Moisture. https://www.uky.edu/bae/sites/www.uky.edu.bae/files/Ins_FS_Moisture_ENERGYWI%24E.pdf.
- [3] Lopez Hurtado, P. et al. 2016. A review on the properties of cellulose fiber insulation. *Building and Environment* 96, pp.170-177. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.031.
- [4] Vejelis, S. et al. 2006. Performance of Loose-Fill Cellulose Insulation. *Materials Science* 12 (4), pp. 338-340.
- [5] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2014. RIL-255-1-2014 Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Taulukot L4.8, L4.9 ja L4.10. Tampere.
- [6] Ojanen, T. 2017. Moisture performance of mineral wool insulation products in highly insulated structures. 11th Nordic Symposium on Building Physics (NSB2017), 11-14 June 2017, Trondheim, Norway.
- [7] Hakala, K. 2015. Maanvarainen villaeristeinen kuitubetonilattia. Insinööriyö. Helsinki, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- [8] Ojanen, T. ja Laaksonen, J. 2016. Hygrothermal performance benefits of the cellulose fibre thermal insulation structures. 41st IAHS World Congress. Sustainability and Innovation for the Future. 13-16 September 2016, Albufeira, Portugal.

Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet

Eero Tuominen, Maarit Vainio ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratorion rakennusfysiikan tutkimusryhmässä tehtiin COMBI-hankkeen yhteydessä kattavat rakennusfysikaalisten materiaaliominaisuuksien määrittäykset Suomen markkinoilla saatavilla olleille kalsiumsilikaattilevyille. Tutkittujen kalsiumsilikaattien tuotenimet ovat Kasil E, Promasil 1000, Epatherm, Skamotec 225 ja Kasil Pura.

Tutkimuksessa määritettiin kaikkien tuotteiden kuivatiheys uunikuivauksen jälkeen, vesihöyrynläpäisevyys märkäkuppikokeena, vedenimeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus vapaan veden imeytyskokeella, hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä kosteushuoneolosuhteisiin tasaannuttamalla, kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä painelevylaitteistolla sekä lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti lämpövirtalevylaitteella.

Tässä artikkelissa esitellään lyhyesti materiaaliominaisuuksien mittaamenetelmät ja niiden virhelähteet. Myös kokeiden tulokset sekä mahdolliset erot kirjallisuustulosten ja mitattujen arvojen välillä esitellään. Erot valmistajien ilmoittamissa ja mitatuissa materiaaliominaisuuksissa ovat pääasiassa niin pieniä, että valmistajan ilmoittamien materiaaliominaisuuksien perusteella on mahdollista valita oikea tuote oikeaan paikkaan.

1. Johdanto

COMBI-hankkeen yhteydessä tutkittiin Suomen rakennustuotemarkkinoilla saatavilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaalisia materiaaliominaisuuksia. Kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet ovat mielenkiintoisia, koska niitä voidaan tietyn ehdoin käyttää vanhojen kellareiden sisäpuolisessa lisälämmöneristämässä.

Tutkittujen kalsiumsilikaattien tuotenimet ovat Kasil E, Promasil 1000, Epatherm, Skamotec 225 ja Kasil Pura. Pääasiallisesti tutkimuksen teki Maarit Vainio diplomityönä [1] Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laboratorion Rakennusfysiikan tutkimusryhmän laboratoriotiloissa vuosien 2015-2016 aikana. Tässä artikkelissa esitellään lyhyesti tutkitut materiaaliominaisuudet sekä niiden mittaamenetelmät virhelähteineen. Lisäksi esitellään mittaustuloksina saadut materiaaliominaisuuksien arvot sekä valmistajien ilmoittamat arvot.

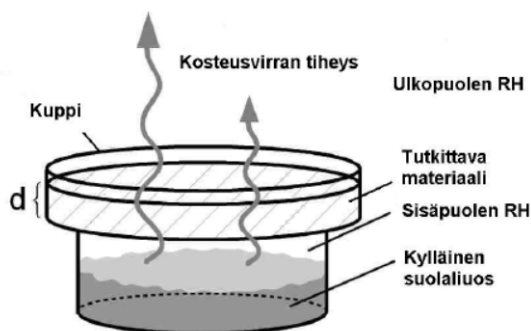
2. Materiaaliominaisuudet

Tutkittuja materiaaliominaisuuksia olivat kuivatiheys, vesihöyrynläpäisevyys, vedenimeytymiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. Kuivatiheys määritettiin standardin mukaisen uunikuivauksen jälkeen. Seuraavissa kappaleissa esitellään lyhyesti muut materiaaliominaisuudet sekä niiden mittaamenetelmät.

2.1 Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys kuvaa materiaalin kykyä läpäistä ilmankosteutta. Suuren vesihöyrynläpäisevyyden materiaalit pyrkivät tasoittamaan materiaalikerroksen eri puolilla olevaa ilman vesihöyrypitoisuutta, kun taas matalan vesihöyrypitoisuuden materiaalit pitävät kosteuspitoisuuseroa yllä.

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden mittaaminen kuppikokeella perustuu kosteuden tasaiseen virtaukseen. Kokeessa materiaali asennetaan tiiviiksi kanneksi kuppiin, jonka sisällä on vakiona pysyvä suhteellinen kosteus, joka saadaan aikaan suolaliuksella. Kuppi viedään kosteuhuoneeseen, jonka ilman suhteellinen kosteus eroaa kupin sisällä olevasta. Koe suoritetaan vakioämpötilassa, jolloin vakiona pidettävästä suhteellisesta kosteudesta seuraa vakio vesihöyrypitoisuus. Vesihöyrypitoisuusero aiheuttaa kosteusvirran testattavan kappaleen läpi.



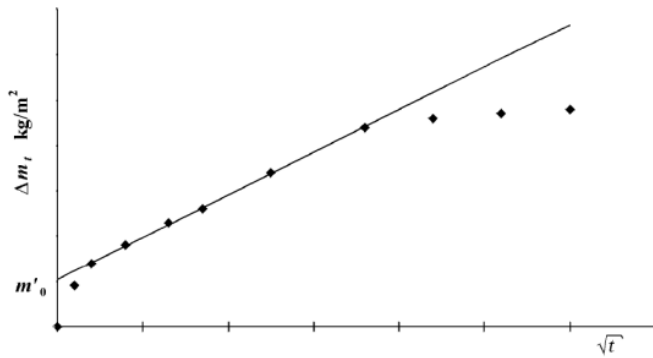
Kuva 1. Märkäkuppikokeen toimintaperiaate ja koekuppi punnituksessa. [2]

Kosteusvirran suuruus mitataan seuraamalla kupin painon muutosta. Painomuutoksen perusteella tiedetään kylläisestä suolaliuksesta haihtuneen (tai siihen sitoutuneen) kosteuden massa. Kosteusvirran perusteella voidaan laskea materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, kun huomioidaan koekappaleen pinta-ala sekä paksuus. Koejärjestelyn virhelähteitä ovat muun muassa lämpötilan vaihtelu ja siitä seuraava suhteellisen kosteuden vaihtelu, koekappaleiden dimensioiden mittaus ja etenkin kosteutta läpäisevän pinta-alan määrittäminen, punnitusten tarkkuus sekä käyttäjän tekemät virheet, kuten kylläisen suolaliuksen läikyttäminen punnitusten yhteydessä.

2.2 Vedenimeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus

Vedenimeytymiskerroin on yksinkertaisesti määritettävissä oleva suure, joka kuvaa materiaalin kosteudensiirtokykyä nestemäiselle vedelle. Tietokonemallinnuksessa nestemäisen veden siirtoa kuvataan usein kapillaarisella kosteusediffusiviteetilla, jonka suuruutta voidaan arvioida vedenimeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden avulla. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus voidaan määrittää samassa kokeessa kuin vedenimeytymiskerroin. Se kuvaa materiaalin suurinta saavutettavissa olevaa kosteuspitoisuutta ilman ulkoisten voimien, kuten hydrostaattisen paineen, vaikutusta.

Vedenimeytymiskerroin voidaan määrittää vapaan veden imeytyskokeella, jossa säännöllisen muotoisen koekappaleen alapinta asetetaan vesikosketukseen. Koekappaleen painon muutosta seurataan vesikosketuksen aikana. Painon muutos jaettuna imeytyspinta-alalla sekä suhteutettuna ajan neliöjuureen on materiaalin vedenimeytymiskerroin. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus katsotaan saavutetuksi, kun painon muutoksessa havaitaan taitekohta.



Kuva 2. Vapaan veden imeytyskokeen painonnousukäyrä. [3]

2.3 Hygroσκοoppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä

Avohuokoisen materiaalin huokokset ovat yhteydessä ympäröivään ilmaan. Tämän yhteyden kautta materiaalin huokosten kosteuspitoisuus tasapainottuu materiaalista riippuvaan ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden mukaiseen tasapainokosteuteen. Osa kosteudesta sitoutuu huokosten pinnoille eri voimien vuoksi, joten materiaalien kosteuspitoisuus [kg/m^3] on usein moninkertainen ympäröivän ilman kosteuspitoisuuteen verrattuna. Materiaalin kosteuspitoisuus muuttuu ilman kosteuspitoisuuden muuttuessa.

Erittäin kosteissa olosuhteissa huokosten pinnoille kertynyt kosteus määrä hiljalleen kasvaa useiden molekyylikerrosten paksuiseksi ja lopulta huokokset täyttyvät vedellä. Tästä johtuen tasapainokosteuskäyrä on jatkuva suure alkaen kuivasta tilanteesta ja päättyen vedellä kyllästyneeseen tilaan. Mittaustekniikan vuoksi tasapainokosteuskäyrä kuitenkin jaetaan hygroσκοoppiseen ja kapillaariseen osaan; kapillaarisella alueella suhteellisen kosteuden muutokset ovat hyvin pieniä, mutta kosteuspitoisuuden muutokset hyvin suuria ja siksi kosteuspitoisuuden tasapainottaminen tehdään eri tekniikalla kapillaariselle ja hygroσκοoppiselle alueelle.

Tasapainokosteuskäyrä esitetään erikseen adsorptiolle ja desorptiolle. Desorptiokäyrällä materiaalin tasapainokosteuspitoisuus on adsorptiokäyrän yläpuolella. Tämä johtuu niin sanotusta mustepulloefektistä; pienten huokosten ympäröivät suuremmat huokokset eivät täyty pienten huokosten tahdissa kosteuspitoisuuden noustessa, mutta täytyttyään ne eivät pääse kosteuspitoisuuden laskiessa tyhjenemään, koska pienemmät huokokset estävät kosteuden poistumisen.

2.3.1 Hygroσκοoppisen tasapainokosteuskäyrän määrittäminen

Hygroσκοoppinen tasapainokosteuskäyrä määritetään tasapainottamalla koekappaleet vakiona pidettäviin ympäröiviin olosuhteisiin. Materiaalista ja koekappaleen koosta riippuen tasapainottaminen voi viedä muutamasta tunnista useisiin kuukausiin. Tasapainottaminen tehdään useisiin eri ympäröiviin olosuhteisiin, jotta tasapainokosteuskäyrältä tulee mitatuksi mahdollisimman monta tunnettua pistettä.

Adsorptiokäyrän määrittäminen aloitetaan uunikuivilla koekappaleilla. Desorptiokäyrän määrittäminen aloitetaan vastaavasti joko vakuuikyllästetystä tai hyvin kosteisiin olosuhteisiin tasapainotetusta tilasta. Kosteuspitoisuus saadaan vertaamalla koekappaleen tasapainotettua painoa kappaleen uunikuivaan painoon.

2.3.2 Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittäminen

Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä määritetään painelevylaitteella. Koekappaleet kyllästetään ensin vedellä vakuumointilaitteiston avulla. Kun kappaleiden koko huokosverkosto on saatu täytettyä vedellä, ne asetetaan painelevylaitteeseen. Painelevylaitteessa koekappaleiden ympärille tuotetaan ylipaine. Ylipaine tunkeutuu koekappaleen huokosiin, jotka on yhdistetty huokoiseen painelevvyyn. Koekappaleeseen sitoutunut kosteus pääsee poistumaan painekammioista painelevyn huokosverkoston kautta. Kosteuden poistumista vastustaa kapillaariset voimat, joiden suuruus on usein riippuvainen enimmäkseen huokoskoosta. Tästä seurauksena määrättyllä painetasolla kosteus saadaan poistumaan vain määrätyn kokoisista huokosista.

Kapillaaristen voimien suuruus ja huokoskoko voidaan laskennallisesti yhdistää vastaamaan ilman vesihöyrypitoisuutta, joten painelevylaitteen koetulos voidaan yhdistää hygroskoopin tasapainokosteuskäyrään. Painelevylaitteistossa 100 bar aine vastaa noin 93 % RH suhteellista kosteutta ja tätä pienemmät paineet tätä kosteampia olosuhteita. Painelevylaitteistolla saadaan määritettyä ainoastaan tasapainokosteuden desorptiokäyrä.

2.4 Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti

Lämmönjohtavuus kuvaa, miten hyvin jokin aine johtaa lämpöä. Mitä suurempi lämmönjohtavuus materiaalilla on, sitä heikommin se toimii lämmöneristeenä. Ominaislämpökapasiteetti sen sijaan kuvaa materiaalin kykyä sitoa lämpöenergiaa. Edellä mainitut suureet voidaan mitata lämpövirtalevylaitteella, jossa materiaalikerroksen yli tuotetaan lämpötilaero ja näin synnytetyn lämpövirran suuruus mitataan.

Lämmönjohtavuus on laskettavissa suoraan lämpövirran suuruudesta, lämpötilaerosta ja koekappaleen paksuudesta. Lämpövirta määritetään lämpövirtalevyllä, jossa ohuen muovinauhan ympärille on kiedottu termoelementtiketju. Termoelementtiketjussa eri metalleista kiedottu johdin tuottaa jännitteen, joka on riippuvainen lämpötilaerosta johtimen päiden välillä. Ohut muovinauha puolestaan toimii lämmönjohtimena, jonka pintojen välille muodostuu pieni lämpötilaero. Lämpövirtalevyn pintojen välinen lämpötilaero voidaan kalibrointien avulla muuntaa levyn läpi kulkevan lämpövirran arvoksi.

Ominaislämpökapasiteetti määritetään tasapainottamalla ensin koekappale tiettyyn lämpötilaan. Tämän jälkeen koekappaleen pintojen lämpötilaa muutetaan ja nyt syntyvä lämpövirta koekappaleen eri pinnoilla mitataan. Eri hetkillä mitattujen lämpövirtojen suuruuden ja vaikutusajan tulo on yhtä kuin koekappaleeseen sitoutunut energiamäärä. Kun lämpövirtoja seurataan koekappaleen lämpötilan tasoittumiseen asti, voidaan energiamäärän ja lämpötilan muutoksen sekä koekappaleen koon ja painon perusteella laskea koemateriaalin ominaislämpökapasiteetti.

3. Tulokset

Mittaustulokset on esitetty taulukossa 1 ja kuvissa 3 ja 4. Osalle materiaaleista on lisäksi saatavissa valmistajan ilmoittamat materiaaliominaisuuksien arvot, jotka on esitetty taulukossa 2. Mittaustulokset noudattivat pääasiassa valmistajan ilmoittamia arvoja, jotka ovat yhteneviä muualla kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin. Erot valmistajien ilmoittamissa ja mitatuissa materiaaliominaisuuksissa ovat pääasiassa niin pieniä, että valmistajan ilmoittamien materiaaliominaisuuksien perusteella on mahdollista valita oikea tuote oikeaan paikkaan.

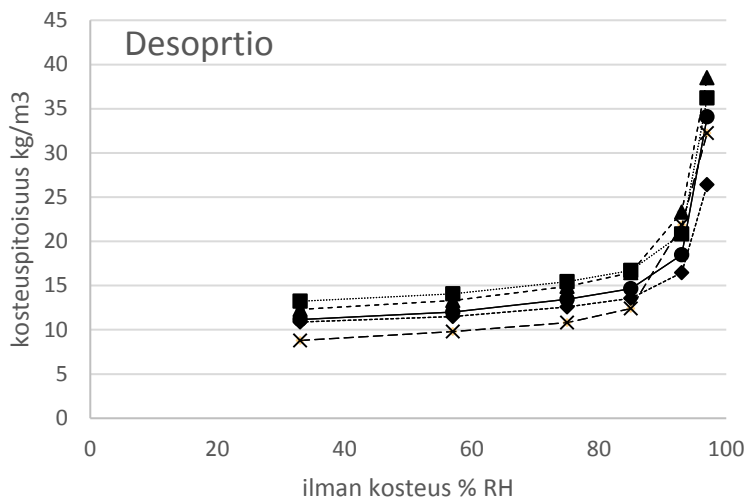
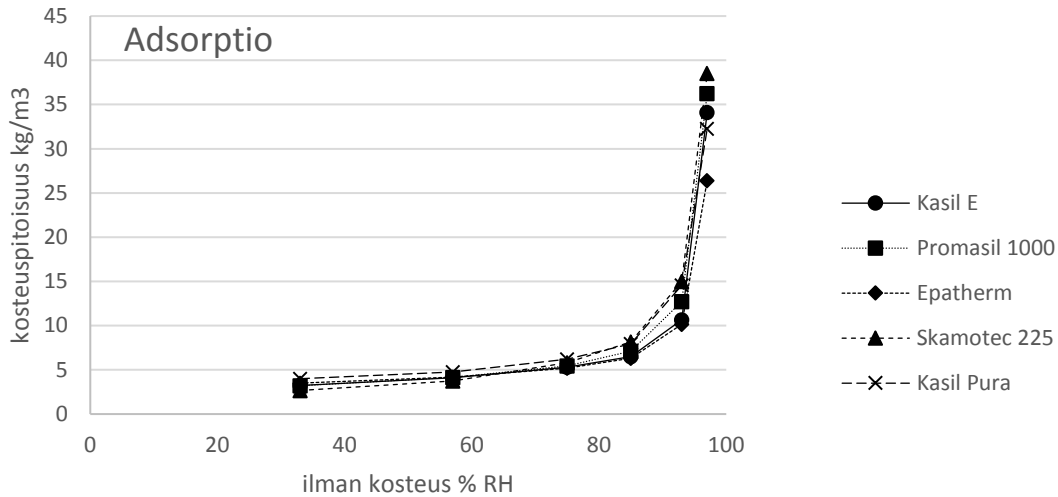
Taulukko 1. Mittaustulokset.

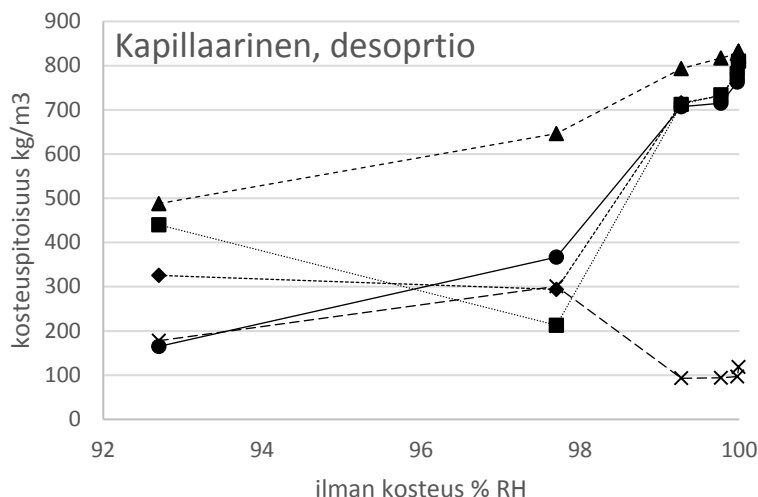
Materiaali	h [mm]	ρ_{dry} [kg/m ³]	$\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	W_{cap} [kg(m ³)]	λ [W/mK]	C_p [J/kgK]
Kasil E	25	253	8,14	1,182	832	0,076	860
Promasil 1000	25	232	7,98	1,199	839	0,071	790
Epatherm	30	236	9,32	1,288	837	0,070	830
Skamotec 225	50	227	10,8	0,643	700	0,072	820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

Taulukko 2. Valmistajien ilmoittamat ominaisuudet.

Materiaali	h [mm]	ρ_{dry} [kg/m ³]	$\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	W_{cap} [kg(m ³)]	λ [W/mK]	C_p [J/kgK]
Kasil E	25	300	5,81 ⁽¹⁾	1,292	830	0,0626	-
Promasil 1000	25	245	-	-	-	0,070	-
Epatherm	30	230	8,93 ⁽¹⁾	-	-	0,060	-
Skamotec 225	50	225	3,42 ⁽¹⁾	-	-	0,061	-
Kasil Pura	50	130	8,93 ⁽¹⁾	0,417	-	0,040	-

⁽¹⁾ Laskettu diffuusiovastuskertoimesta.





Kuva 3. Mitatut tasapainokosteuskäyrät. Kapillaarisen alueen desorptiokäyrällä 92,7 ja 97,7 % RH lukemat ovat epäluotettavia mittaustuloksissa mahdollisesti tapahtuneiden virheiden vuoksi.

Tutkimuksiin saatiin varsin kattava valikoima Suomen markkinoilla saatavilla olevia kalsiumsilikaattilevyjä. Materiaaliominaisuuksien puolesta eri tuotteiden välillä on kuitenkin niin suuria eroja, että COMBI-hankkeessa tehdyt mallinnukset kellarin seinien sisäpuolisesta lisälämmöneristyksestä [4] eivät ole kosteusteknisesti turvallisia kaikilla tuotteilla. Rakennustuotteiden valinnan tuleekin perustua tuotteiden materiaaliominaisuuksiin eikä materiaalityypin yleisiin ominaisuuksiin.

Erillisenä mainintana nostettakoon tässä kohtaa esiin myös, että Kasil Pura ei ole kalsiumsilikaattilevy, vaan kyse oli kalsiumsilikaattieristeille vaihtoehtoisena ja edullisempänä tuotteena markkinoidusta valkokalkkihydraattilevystä. Materiaaliominaisuuksiensa perusteella myös tälle tuotteelle on omat soveltuvat käyttökohteensa.

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa määritettiin Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet. Määritetyt materiaaliominaisuudet noudattivat pääpiirteittäin valmistajien ilmoittamia ja kirjallisuudessa esitettyjä arvoja. Eri tuotteiden väliltä löytyi kosteusteknisten ominaisuuksien osalta merkittäviä eroja, jotka tulee ottaa huomioon, jos tuotteita käytetään haastavissa kohteissa.

Lähdeluettelo

- [1] Vainio M. 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö
- [2] Manelius E. 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö
- [3] SFS-EN ISO 15148. 2003. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Brussels, European Committee for Standardization, 38 s.
- [4] Heiskanen R. 2016. Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö

Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen

Kari Vänttinen, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tämä artikkeli on laadittu Tampereen teknillisessä yliopistossa tehdyn diplomityön pohjalta, joka on osa Combi-hanketta. Diplomityössä tutkittiin sisäkuoribetonin rakennusfysikaalisia kosteusominaisuuksia. Tutkittavia betonin kosteusominaisuuksia olivat vedenimeytymis- ja vedentunkeutumiskerroin, vesihöyrynläpäisevyys, hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus sekä maksimikosteuspitoisuus. Tutkittavia betonielementin sisäkuoressa käytettäviä betonilaatuja oli kolme, joista jokainen eri betonivalmistajalta. Tässä artikkelissa esitetään keskeisimmät saadut tutkimustulokset.

Tutkimuksessa havaittiin, etteivät hygroskooppisen tai kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän testausstandardien mukaiset tutkimusmenetelmät ole kaikilta osin toimivia ainakaan lujilla betonilaaduilla; tasapainokosteuskäyrien testausajat muodostuivat pitkiksi ja koekappaleet eivät saavuttaneet maksimikosteuspitoisuutta kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämiseksi laaditun standardin mukaisella vedellä kyllästämisellä.

1. Johdanto

Rakentamisen suurimpia ongelmia ovat kosteusvauriot ja niiden aiheuttamat sisäilmaongelmat. Rakenteen toimivuutta ja rakenneosien kuivumisaikoja voidaan tarkastella laskennallisesti, jolloin rakennusmateriaalien tarkkojen kosteusteknisten ominaisuuksien tunteminen on tärkeää. Betonin ominaisuuksia on aiemmin tutkittu paljon. Tällä tutkimuksella haluttiin tarkentaa sisäkuoressa käytettävien betonien kosteusteknisiä ominaisuuksia.

2. Tutkitut materiaalit

Tutkittavana oli kolmen suuren Suomessa toimivan betonivalmistajan sisäkuorielementissä käyttämää betonia. Betonivalmistajat on nimetty ”Betoni 1”, ”Betoni 2” ja ”Betoni 3”. Betoni 1 ja Betoni 2 toimitettiin elementteinä elementtitehtaalta. Elementeistä porattiin koekappaleet. Betoni 3:n betoni tuotiin läheiseltä valmisbetoniasemalta betoniautolla Tampereen teknilliselle yliopistolle, jossa valettiin sisäkuorielementtejä. Kaikkien elementtien paksuudet olivat 150 mm. Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen betonien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Tutkittujen betonien ominaisuudet.

Valmistaja	Lujuus	Sementti	V/S	Notkeus	Vesimäärä	Huokostin	Notkistin
Betoni 1	K40	Superrapid	0,484	IT	174,4 kg/m ³	Kyllä	Kyllä
Betoni 2	K50	Rapid	0,390	S3	158,6 kg/m ³	Kyllä	Kyllä
Betoni 3	K50	Superrapid	0,449	S3	193 kg/m ³	Ei	Kyllä

Jokaiselle betonilaadulle oli määrätty suurimmaksi runkoaineen raekooksi 16 mm. Betoni 3:n seassa havaittiin myös 32 mm runkoainetta. Betoni 3:n lujuuksi todettiin taulukossa 1 esitetystä

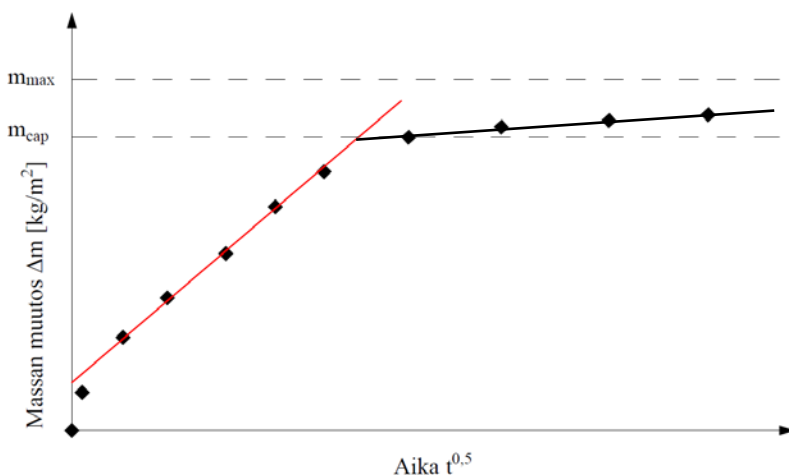
ominaislujuudesta poiketen standardin SFS-EN 12390-3 [1] mukaisessa puristuskokeessa 28 vuorokauden jälkeen K40.

3. Tutkimusmenetelmät

3.1 Vedenimeytymisominaisuudet, vedenimeytyskoe

Vedenimeytyskoe toteutettiin Eero Tuomisen kehittämällä automaattisella vapaan veden imeytyslaitteistolla [2] ja vedenimeytymiskertoimen määrittämiseksi laaditun standardin SFS-EN ISO 15148 [3] mukaisesti. Kokeesta tuloksena saatiin painonmuutoskuvaaja ajan funktiona, jota korjattiin laskennallisesti veden haihtumisesta johtuvan nosteen pienenemisen vuoksi.

Laskennallisesti korjatusta painonmuutoskuvaajasta määritettiin regressiosuorat alun lineaariselle osalle ja osuudelle, joka alkaa kapillaarisesti nousevan veden yltäessä koekappaleen yläpintaan. Esimerkki painonmuutoskuvaajasta ja regressiosuorista on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Veden imeytyskokeen painonmuutoskuvaaja.

Vedenimeytymiskerroin A_w on kuvassa 1 ensimmäisen regressiosuoran kulmakerroin. Vedentunkeutumiskerroin B_w voidaan määrittää tiedettäessä koekappaleen korkeus ja regressiosuorien leikkauskohdan ja vesiupotuksen alkamisen välinen aika. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus saavutetaan regressiosuorien leikkauskohdan ajanhetkellä

Betoni 3:lla tutkittiin vedenimeytymiskertoimen ja vedentunkeutumiskertoimen muuttumista ajanfunktiona alkaen vuorokausi koekappaleiden valamisesta, olettaen vedenimeytymisominaisuuksien pienenevän betonin lujuuden kasvaessa. Lisäksi Betoni 3:lla vertailtiin putkeen valetun betonin ja laataksi valetun betonin veden imeytymisominaisuuksien eroa. Betoni 1:n ja Betoni 2:n betoneista tehtiin kaksi koesarjaa.

3.2 Vesihöyrynläpäisevyys, märkäkuppikoe

Koemateriaalien vesihöyrynläpäisevyyttä tutkittiin märkäkuppikokeella. Koejärjestelyt suoritettiin Elina Maneliuksen materiaalien vesihöyrynläpäisevyysskokeen kehittämistä käsittelevän diplomityön [4] mukaisesti ja materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden tutkimiseksi laaditun standardin SFS-EN 12572 [5] mukaisesti. Koejärjestelyssä käytettiin standardista poiketen 20 mm korkeita koekappaleita, koska kosteusvirta betonin läpi on hyvin pientä. Kokeessa asetettiin alumiinisen koekupin pohjalle kylläinen suolaliuos muovisastiassa ja

koekappale tiivistettiin alumiinikupin reunoja vasten. Koekupin sisäpuolisena suhteellisen kosteuden arvoksi valittiin RH 93 %, joka saatiin aikaan käyttämällä suolana kaliumnitraattia (KNO_3). Koekupit säilytettiin olosuhdehuoneessa, jonka suhteellinen kosteus oli RH 50 % ja lämpötila 23 °C. Koekuppien painon muutosta seurattiin tasaisin väliajoin, jonka perusteella pystyttiin laskemaan kosteusvirran tiheys g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$). Kosteusvirran tiheyden avulla pystytään ratkaisemaan myös tutkittavan aineen vesihöyrynläpäisevyys σ_v (m^2/s).

3.3 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, kosteuskaappi

Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän tutkimus toteutettiin standardin SFS-EN ISO 12571 [6] mukaisesti. Kokeessa uunikuivatut ja kuivana punnitut koekappaleet asetettiin tasaantumaan tiettyyn ilman suhteelliseen kosteuteen. Tietty koetilan suhteellinen kosteus saatiin aikaan kylläisellä suolaliuoksella ja tiiviillä koekaapilla. Tasapainokosteudet päätettiin tutkia kuudessa suhteellisen kosteuden pitoisuudessa adsorptiossa ja desorptiossa. Standardin mukaan tasaantuminen tiettyyn suhteellisen kosteuden arvoon on tapahtunut, kun kolmen peräkkäisen 24 tunnin välein tehdyn punnituksen aikana massan muutos on enintään 0,1 %. Massan muutos oli ensimmäisistä päivistä alkaen alle 0,1 %, joten betonikoekappaleita punnittiin tasaisin väliajoin ja seurattiin koekappaleiden tasapainokosteuden saavuttamista kosteuspitoisuus–aika –kuvaajalla.

Standardista poikettiin koekappaleiden paksuuden osalta tutkimusajan lyhentämiseksi. Standardissa on esitetty koekappaleiden paksuudeksi vähintään 3 kertaa suurin raekoko, joten koekappaleiden paksuudeksi olisi tullut vähintään 48 mm. Tässä kokeessa käytettiin noin 20 mm paksuja koekappaleita. Kokeen ajallinen kesto todettiin pitkäksi standardin mukaisia koekappaleita ohuemmillakin koekappaleilla. Esimerkiksi tasapainokosteuden saavuttaminen suhteellisessa kosteudessa 33 RH %:a kesti noin 200 vuorokautta.

Pitkästä tasaantumisajasta johtuen hygroskooppiset tasapainokosteuskäyrät pyrittiin määrittämään murskattujen koekappaleiden avulla. Murskattavat koekappaleet olivat lieriöitä, joiden korkeus oli noin 15 mm ja halkaisija noin 70 mm. Koekappaleet uunikuivattiin 105 °C:n lämpötilassa. Uunikuivista koekappaleista mitattiin kuivapaino. Koekappaleet murskattiin siten, että kaikki kappaleet läpäisevät 12 mm seulan. Hienoaineksen määrä pyrittiin pitämään murskauksessa mahdollisimman vähäisenä. Murskatut koekappaleet uunikuivattiin uudelleen alumiiniastioissa, jonka avulla voitiin todeta murskauksessa tapahtunut painon menetys. Murskattujen koekappaleiden tasapainokosteuksien määrittäminen toteutettiin muilta osin kuten kokonaisilla koekappaleilla.

3.4 Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, painelevykoee

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittäminen toteutettiin painelevykokeella standardin NT BUILD 481 [7] mukaisesti. Kokeita varten tehtiin jokaisesta betonista kolme 12 koekappaleen sarjaa. Koekappaleiden halkaisija oli noin 52 mm ja korkeus hiottuna noin 6–9 mm. Standardin mukaan koekappaleet tulee kuivata uunissa 105 °C:n lämpötilassa ennen vedellä kylläistämistä. Kokeessa käytettiin kuitenkin 60 °C:n kuivatuslämpötilaa, ettei betoni pääse vaurioitumaan kuivatuksessa. Kuivatuslämpötilan vaikutus koekappaleiden kyllästymisasteeseen testattiin ja todettiin vähäiseksi.

Uunikuivatut koekappaleet asetettiin vakumilaitteen alipaineistusastiaan vakumoitavaksi. Vakumoinnilla pyritään poistamaan ilma huokosista, jolloin huokokset pääsevät täyttymään vedellä. Vakumointiaika oli 6–24 tuntia, jonka jälkeen koekappaleet asetettiin vesiupotukseen de-

ionisoituun veteen vähintään vuorokaudeksi. Standardin mukainen vakumointiaika on kolme tuntia, jonka jälkeen koekappaleet saatetaan vesiupotukseen, ja vakumointia jatketaan vesiupotuksessa tunnin ajan.

Kyllästetyt koekappaleet asetettiin painekammioon de-ionisoidulla vedellä kyllästetyn ja kokeessa käytettävässä paineessa paineistetun painelevyn päälle. Koekappaleen ja painelevyn välille muodostui kapillaarikontakti. 31 bar:n ja 100 bar:n kokeissa käytettiin painelevyn tilalla selluloosakalvoa. Painekammiot saatettiin tiettyyn paineeseen, jolloin ulkoinen paine tasaantui koekappaleiden huokostilaan. Paineen tasaantuessa huokosissa vaikuttava alipaine pienenee ja kosteutta poistuu koekappaleesta painelevyn kautta. Tuloksena saatiin koekappaleen kosteuspitoisuus tietyssä huokostilan paineessa. Tutkitut painetasot olivat 0,316 bar, 1 bar, 3,16 bar, 10 bar, 31,6 bar ja 100 bar. Kapillaarinen tasapainokosteus voidaan esittää joko huokosalipaineen s (Pa) tai huokosten säteen r (m) funktiona. Kaavassa 1 on esitetty huokosten säteen laskeminen.

Standardin mukaan tasaantumisaika on riittävä, kun painelevyyn liitetyn putken kautta tulee kosteutta vähemmän kuin $0,05 \text{ cm}^3$ 48 tunnin aikana. Kokeissa ei tullut vettä poistoputken kautta aivan ensimmäisiä tunteja lukuun ottamatta, joten koeaikaa jatkettiin 14 vuorokauden pituiseksi. Kokeeseen liittyen oli aikaisempia tuloksia standardin mukaisen koeajan riittämättömyydestä [8]. 14 vuorokauden paineistuksen jälkeen koekappaleet punnittiin ja laskettiin kosteuspitoisuudesta keskiarvo. Koekappaleet uunikuivattiin ja kyllästettiin vedellä ennen seuraavaa koetta.

4. Tutkimustulokset

4.1 Veden imeytyskoe, tulokset

Koesarjojen koekappaleet on porattu vaakaan valetuista betonielementeistä. Betoni 1:stä tehtiin kaksi koesarjaa, jotka testattiin betonin ollessa 147 ja 278 vuorokauden ikäistä. Betoni 2:n betonielementistä testattiin myös kaksi koesarjaa, jotka testattiin 245 ja 370 vuorokauden ikäisestä betonista. Betonista 3 tehdystä betonielementistä testattiin yksi koesarja 215 vuorokauden kuluttua valamisesta. Kokeista saadut vedenimeytymiskertoimien ja vedentunkeutumiskertoimien arvot on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 1. Vedenimeytymiskertoimen ja veden tunkeutumiskertoimen tulokset.

Kapillariteettikerroin A_w [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$]			
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 %:n luottamusväli
Betoni 1	1,90E-03	1,25E-03	1,03E-03
Betoni 2	1,26E-03	4,84E-04	3,98E-04
Betoni 3	5,65E-03	9,45E-04	1,59E-03
Veden tunkeutumiskerroin B^w [$\text{mm}/\text{s}^{0,5}$]			
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 %:n luottamusväli
Betoni 1	4,74E-02	3,54E-02	2,91E-02
Betoni 2	4,36E-02	8,63E-03	7,10E-03
Betoni 3	9,11E-02	1,03E-02	1,74E-02

Taulukosta 1 voidaan havaita eri betonilaaduilla hajontaa tuloksissa keskenään. Myös koekappaleiden välillä on paljon hajontaa, josta kertoo suuri 90 %:n luottamusväli tuloksissa.

Kapillaarinen kyllästyskosteus w_{cap} (kg/m^3) tutkittiin jokaisen tutkitun betonin osalta ensimmäisestä koesarjasta. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

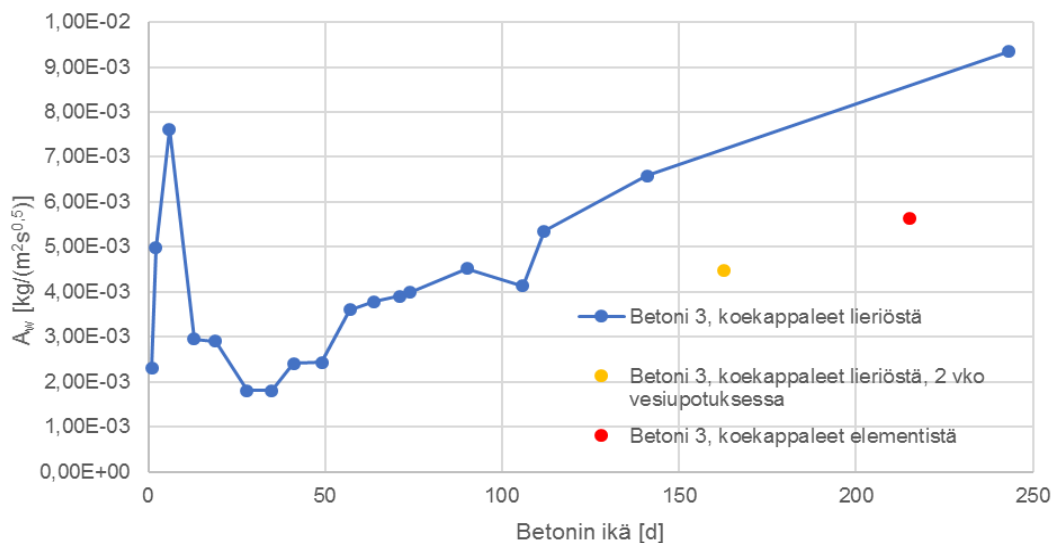
Taulukko 2. Tutkittujen betonien kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Taulukossa on esitetty myös tutkimushetki betonin valmistuksesta, tuloksen 90 %:n luottamusväli ja luottamusvälin hajonta.

Betonilaatu	Aika valusta (d)	w_{cap} (kg/m^3)	90% luottamusväli (kg/m^3)	luottamusvälin hajonta
Betoni 1	147	130,1	3,0	2,27 %
Betoni 2	245	131,1	3,4	2,61 %
Betoni 3	215	134,5	9,6	7,11 %

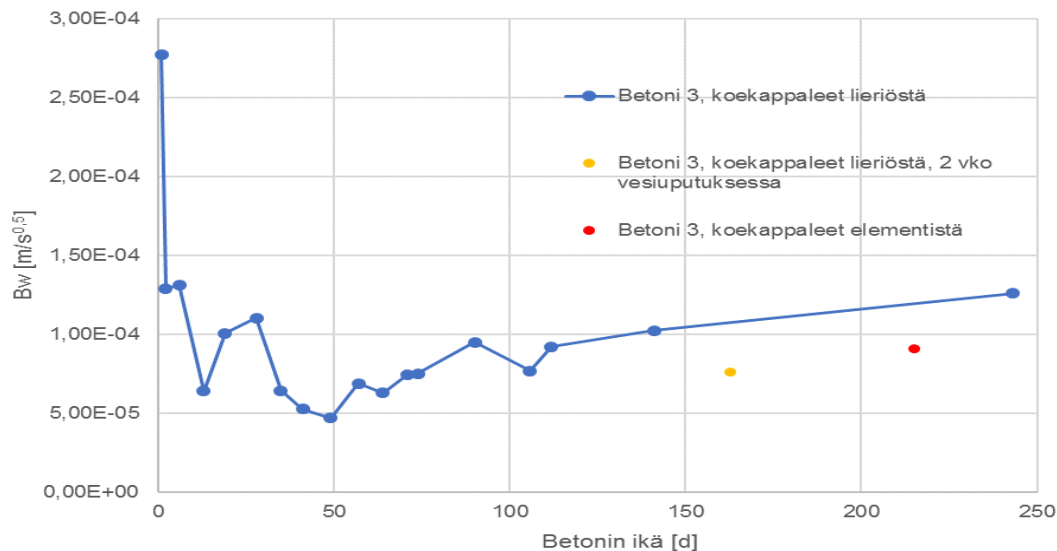
Taulukosta 3 voidaan havaita kapillaaristen kyllästyskosteuspitoisuuksien olevan tutkituissa betoneissa suuruusluokaltaan lähellä toisiaan.

4.1.1 Veden imeytymisominaisuuksien kehittyminen

Betoni 3:n betonilla tutkittiin veden imeytymisominaisuuksien kehittymistä ajan funktiona. Tulokset on esitetty kuvissa 4 ja 5.



Kuva 2. Betonin 3 vedenimeytymiskertoimen A_w kehittyminen ajan funktiona. Koekappaleet on sahattu 50 cm korkeasta lieriöstä noin 20 mm korkeiksi lieriöiksi. Taulukossa on esitetty myös tulokset koesarjasta, jossa koekappaleet kasteltiin vedellä kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen ja annettiin tasaantua RH 50 % suhteelliseen kosteuteen ennen veden imeytyskoetta sekä tulokset 150 mm korkeasta elementistä valmistetuista koekappaleista.

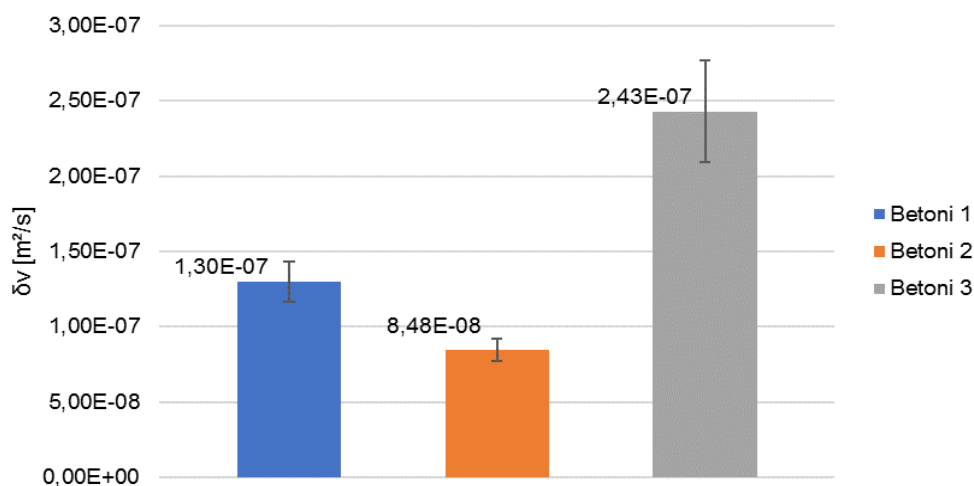


Kuva 3. Betonin 3 veden tunkeutumiskertoimen B_w :n kehittyminen ajan funktiona. Koekappaleet on sahattu 50 cm korkeasta lieriöstä noin 20 mm korkeiksi lieriöiksi. Taulukossa on esitetty myös tulokset koesarjasta, jossa koekappaleet kasteltiin vedellä maksimikosteuspitoisuuteen ja annettiin tasaantua RH 50 % suhteelliseen kosteuteen ennen veden imeytyskoetta sekä tulokset 150 mm korkeasta elementistä valmistetuista koekappaleista.

Kuvien 4 ja 5 perusteella vedenimeytymiskerroin ja vedentunkeutumiskerroin lähtevät kasvamaan noin kuukauden kuluttua valamisesta. Tulokset eivät vastanneet tältä osin hypoteesiä. Alun korkeisiin tuloksiin voi vaikuttaa alun voimakas hydrataatio betonissa ja korkea valamisen jälkeinen kosteuspitoisuus.

4.2 Märkäkuppikoe, tulokset

Märkäkuppikokeella testattiin tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyys ominaisuuksia. Tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevydet on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4. Tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevydet. Jana esittää 90 %:n luottamusväliä.

Kuvasta 6 voidaan havaita Betonin 3 läpäisevän eniten vesihöyryä tutkituista betoneista. Betonin 3 suurempi vesihöyrynläpäisevyys voi selittyä suuremmalla runkoaineen koolla. 32 mm runkoaine voi läpäistä koekappaleen, jolloin vesihöyrynläpäisy kasvaa runkoaineen ja sementtipastan rajapinnan kautta.

4.3 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, tulokset

Pitkästä tasaantumisajasta johtuen adsorptiokäyrältä tutkittiin kolme pistettä ja desorptiokäyrältä kaksi pistettä tämän tutkimuksen yhteydessä. Tulokset on esitetty taulukoissa 6 ja 7.

Taulukko 6. Tutkitut pisteet adsorptiokäyrältä.

RH %	Betoni 1 kg/m ³	Betoni 2 kg/m ³	Betoni 3 kg/m ³
11,7	16,5	16,7	16,6
33	42,4	44,1	48,0
97	139,1	132,0	151,9

Taulukko 7. Tutkitut pisteet desorptiokäyrältä.

RH %	Betoni 1 kg/m ³	Betoni 2 kg/m ³	Betoni 3 kg/m ³
93	123,3	119,2	130,1
85	117,7	115,8	122,7

Taulukosta 6 voidaan huomata korkeat lukemat adsorptiosta suhteellisessa kosteudessa 97 RH %. Tuloksiin vaikuttivat pienet lämpötilan muutokset olosuhdehuoneessa, jolloin betonikoekappaleiden pinnalle pääsi kondensoitumaan vettä. Tästä johtuen tulos ei vastaa hygroskooppisella alueella olevaa tulosta.

4.3.1 Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, murskatut koekappaleet

Murskatuilla koekappaleilla tehtyjen tasapainokosteuskokeiden perusteella tasapainokosteudet jäävät matalalle tasolle verrattuna kokonaisiin koekappaleisiin. Taulukkoon 8 on koottu vastaavien adsorptiokäyrän tutkimuspisteiden tasapainokosteudet, kuin kokonaisilla koekappaleilla tutkittiin.

Taulukko 8. Murskattujen koekappaleiden tasapainokosteudet adsorptiosta.

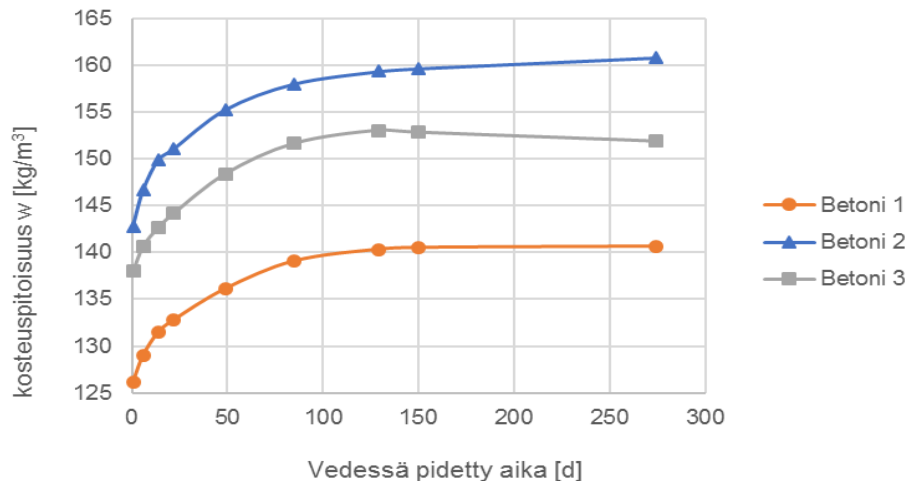
RH %	Betoni 1 kg/m ³	Betoni 2 kg/m ³	Betoni 3 kg/m ³
11,7	11,4	12,1	12,0
33	29,6	28,2	35,4
97	95,5	100,8	108,7

Verrattaessa taulukoita 6 ja 8 huomataan tasapainokosteuksien eron olevan suuri kaikissa tutkituissa suhteellisen kosteuden pitoisuuksissa.

4.4 Painelevykoe, tulokset

4.4.1 Maksimikosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus kasvoi koekappaleissa vesiupotuksessa yli neljän kuukauden ajan standardin NT BUIL 481 [7] mukaisen kyllästämisen jälkeen. Kuvassa 7 on esitettyä koekappaleiden kosteuspitoisuuden lisääntyminen vesiupotuksessa standardin mukaisen kyllästämisen jälkeen.



Kuva 5. Kosteuspitoisuuden kasvaminen koekappaleilla vesiupotuksessa koesarjalla 3.

Kuvan 7 perusteella kosteuspitoisuus nousee noin 10–20 % standardin mukaisen kyllästämisen jälkeen. Tämän perusteella lujilla betoneilla tarvitaan standardin mukaista pidempää vesiupotusaikaa maksimikosteuspitoisuuden w_{max} saavuttamiseksi. Taulukossa 9 on esitettyä koekappaleiden vedellä kyllästämässä saavutetut suurimmat kosteuspitoisuudet.

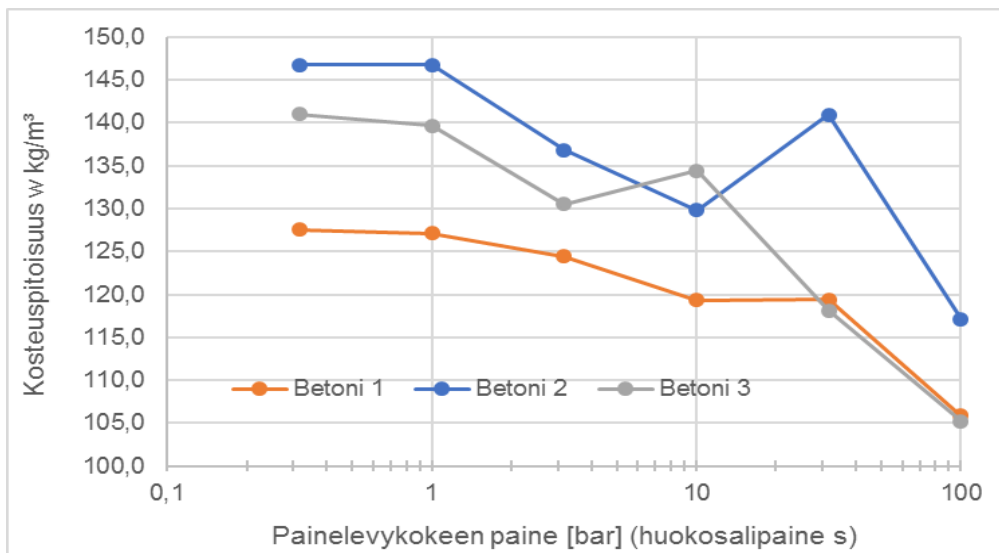
Taulukko 9. Tutkittujen betonilaatujen maksimikosteuspitoisuudet w_{max} koesarja 1:llä.

Betonilaatu	Keskiarvo kg/m ³	Keskihajonta kg/m ³	90 % luottamusväli kg/m ³	Vedessä d
Betoni 1	144,3	8,7	4,5	275
Betoni 2	164,4	13,1	6,8	275
Betoni 3	157,5	8,6	4,5	275

Taulukon 9 perusteella Betonilla 2 on korkein maksimikosteus tutkituista betonilaaduista. Tuloksissa on koesarjan eri koekappaleiden välillä varsin paljon hajontaa johtuen pienestä koekappaleen koosta. Koekappaleiden määränä oli kuitenkin jokaisessa koesarjassa 12, joten 90 % luottamusväli on suhteellisen pieni.

4.4.2 Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tulokset on esitetty kuvassa 8.



Kuva 6. Painelevykokeista saadut kapillaariset tasapainokosteudet.

Kuvasta 8 voidaan havaita Betonin 1 omaavan alhaisemmat tasapainokosteudet kapillaarisella alueella Betoniin 2 tai Betoniin 3 verrattuna. Betonien 1 ja 2 kapillaarisessa tasapainokosteuskäyrässä on havaittavissa selvästi trendistä poikkeavan korkeita tuloksia 31 barin kokeen osalta. 31 barin ja 100 barin kokeissa käytettiin paineastian ja koekappaleiden välissä selluloosakalvoa. On mahdollista, että tiiviin selluloosakalvon läpi ei ole betonin kosteus päässyt tasapainottumaan 14 vuorokauden aikana 31 barin kokeessa Betonien 1 ja 2 koekappaleista. Betoneissa 1 ja 2 oli Betonia 3 pienemmät kapillaariset vedensiirtymisominaisuudet vedenimeytyskokeen perusteella, joka osaltaan hidastaa kosteuden poistumista koekappaleista.

0,316 barin ja 1 barin kokeissa koekappaleilla keskipaino nousi kokeen aikana. Betonista 1 tehdyssä kokeessa myös 3,16 barin kokeessa tapahtui painonnousua koekappaleiden keskipainossa. Ennen pienillä paineilla tehtäviä kokeita ei saavutettu maksimikosteuspitoisuutta, koska koekappaleiden kyllästäminen tehtiin standardia NT BUILD 481 [7] mukaillen. Koekappaleiden kosteuspitoisuudet olivat ennen kyseisiä kokeita keskimäärin Parmalla 122,7 kg/m³, Lujabetonilla 143,3 kg/m³ ja Ruduksella 134,2 kg/m³. Painon nousu koekappaleissa johtuu todennäköisesti kosteuden siirtymisestä vedellä kyllästetystä painelevystä kapillaarisesti koekappaleisiin.

5. Yhteenveto

Tuloksien perusteella rakennusmateriaalien hygroskooppisen ja kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämistä ohjaavia standardeja tulisi kehittää lujien betonilaatujen tutkimisen osalta. Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän määrittämisessä tulisi tutkia standardin mukaista pienempiä koekappaleiden soveltuvuutta kokeeseen, jolloin kosteuspitoisuuden tasaantumisaikat olisivat lyhyemmät. Koekappaleiden tulee olla kuitenkin kokonaisia, murskatuilla koekappaleilla tasapainokosteus ei vastaa kokonaisilla koekappaleilla saatuja tuloksia. Tutkimuksen perusteella koekappaleen tasaantumista olisi suositeltavaa seurata painonmuutoskuvaajan avulla

Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämisessä standardin mukainen koekappaleiden vedellä kyllästäminen ja standardin mukainen kokeen kesto eivät tämän tutkimuksen perusteella ole ajallisesti riittävän pitkiä betonille. Maksimikosteutta pienemmällä koekappaleiden

kosteuspitoisuudella tulokset ovat virheellisiä varsinkin pienillä paineilla. Painelevykokeen toteuttaminen vaatii lisätutkimusta betonin osalta.

Tuloksista on havaittavissa, että eri valmistajien betoneiden kosteudensiirtymisominaisuuksissa on suuria eroja niin vesihöyryn, kuin myös kapillaarisesti siirtyvän kosteuden osalta. Huomion arvoista on myös vedenimeytymiskertoimen ja vedentunkeutumiskertoimen kasvaminen ensimmäisten kuukausien aikana, mikä ei ollut oletettavaa, koska korkealujuksisen betonin tulisi lujituessaan tiivistyä. Syynä tulokseen voi olla mikrohalkeilu, jonka tiedetään kasvattavan veden tunkeutumista betoniin. Asia vaatii lisätutkimusta myös betonin mikrorakenteen kehittymisen osalta.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN 12390-3. 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puhdistuslujuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [2] Tuominen, E. 2016. Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [3] SFS-EN ISO 15148/A1. 2016. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Amendment 1 (ISO 15148:2002, modified). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [4] Manelius, E. 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [5] SFS-EN ISO 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Brussels, European Committee for Standardization.
- [6] SFS-EN ISO 12571. 2014. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties (ISO 12571:2013). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [7] Nordtest method. Retention curve and pore size distribution. 1997. NT BUILD 481. Espoo, Nordtest.
- [8] Vainio, M. 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto.

Viilupuisen (LVL) rakennuksen kosteudenhallinta

Niko Laakso
Sweco Asiantuntijapalvelut Oy

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitetään runkorakenteena käytettävän viilupuun kosteuskäyttäytymiseen, kosteuden mittaamiseen sekä viilupuisen rakennuksen kosteuden hallintaan liittyvät erityispiirteet. Artikkelin perustuu viilupuun kosteuskäyttäytymisestä sekä kosteusmittausmenetelmien soveltuvuudesta tehtyyn tutkimukseen ja käytännön puukerrostalokohteista saatuihin kokemuksiin.

Tutkimuksessa selvitettiin käytännönkohteissa käyttökelpoista viilupuurakenteen kosteusmittausmenetelmää. Tutkittaviksi puun kosteusmittausmenetelmäksi valittiin kosteuden mittaaminen porareikämenetelmällä ja kosteuden mittaaminen sähkönjohtavuuteen perustuvalla piikkimittarilla. Tuloksia verrattiin kuivatus-punnitus-menetelmällä saatuihin mittaustuloksiin.

Viilupuun kastumista ja kuivumista tutkittiin rasittamalla viilupuuta n. 10 mm vesipatsaalla lapepinnalta sekä päätypinnalta. Lisäksi selvitettiin hydrofobisen käsittelyn vaikutusta viilupuun kastumiseen ja kuivumiseen. Tulosten mukaan viilupuun pintaviilu kastuu nopeasti kosteuden vaikuttaessa lapepinnan kautta. Kuivumisesta todettiin, että pintaviilu kuivuu suhteellisen nopeasti, mutta liimakerrokset hidastavat alempien viilukerrosten kuivumista huomattavasti. Syrjä- ja päätypintojen kautta kastuminen syvälle viilupuun sisään tapahtuu nopeasti, mutta kuivuminen on selvästi hitaampaa.

1. Johdanto

Suomessa valtiovalta kannustaa lisäämään puun käyttöä rakentamisessa. Tavoitteen perusteena käytetään mm. materiaalien kotimaisuutta ja puun etua pyrittäessä noudattamaan kestävä kehityksen periaatteita. Uusien palomääräysten myötä puun käyttömahdollisuudet kerrostalorakentamisessa ovat parantuneet. Tämän innoittamana on käynnistynyt entistä kunnianhimoisempia puukerrostalohankkeita, joissa runkorakenteena käytetään mm. viilupuuta (LVL).

Rakennuslalla rakennustyönaikainen kosteudenhallinta on kehittynyt harppauksin eteenpäin ja rakennusvalvontaviranomaiset ovat ottaneet näkyvän roolin rakennustyön aikaisen suunnitelmallisen kosteudenhallinnan vakiinnuttamiseksi tavanomaiseksi toimintamalliksi. Kerrostaloissa yleisimmin käytettyjen betonirakenteiden kosteusmittauksen kehitystyötä on tehty vuosia, mutta puurakenteiden kosteusmittauksesta on saatavilla tietoa vain niukasti. Myös viilupuun kosteusmittauksesta yleisesti saatavilla olevan tiedon määrä on vähäinen.

Tehtyjen tutkimusten ja käytännön kohteista saatujen kokemusten perusteella esitetään viilupuurakenteen kosteudenhallinnan erityispiirteet. Rakenteellisella kosteudenhallinnalla on merkittävä rooli viilupuurunkoisen rakennuksen kosteudenhallinnassa.

2. Tutkimusjärjestely

Materiaalina käytettiin 51mm paksuja Kerto-Q- levyjä (LVL-levyt), joissa osa viiluista on asennettu ristiin. Levyistä leikattiin 500*600mm sekä 500*130mm kokoisia koekappaleita. Lapepintoja tutkittaessa koekappaleiden syrjä ja päätypinnat käsiteltiin vesihöyrytiivillä pinnoitteella ja vastaavasti syrjäpintoja tutkittaessa käsiteltiin lapepinnat. LVL-levyt asetettiin ulkoilmaan katoksen alle. Tutkittavalle pinnalle rakennettiin kaukalo, jossa pidettiin noin 10mm korkuista vesipatsasta. Ensimmäiset 2,5 – 3 viikkoa pinnat olivat alttiina vedelle, jonka jälkeen vesi poistettiin ja LVL-kappaleiden annettiin kuivua. Kastumisaika oli lyhyempi tutkittaessa syrjäpinnan kastumista.

LVL-levyjen kastumista tutkittiin kolmessa eri rasiustilanteessa:

1. Jatkuva 10mm vesipatsas levyn lapepinnan päällä
2. Jatkuva 10mm vesipatsas levyn syrjäpinnan päällä
3. Lapepinnan kastelu 2-3 päivän välein

Ensimmäisessä ja toisessa rasiustilanteessa simuloitiin työmaaoiloissa pahinta mahdollista tilannetta, jossa vesi pääsee lammikoitumaan puurakenteen päälle eikä lammikoitunutta vettä poisteta.



Kuva 1. Koekappaleiden valmistelu.

Kolmannessa rasiustilanteessa simuloitiin ulkoilman viistosaderasitusta. Koekappaleista valmistettiin kaksi rinnakkaista kappaletta. Jokaisessa rasiustilanteessa tutkittiin samanaikaisesti käsittelemättömiä sekä hydrofobisella liuoksella pinnoitettuja koekappaleita. Käytetty hydrofobinen liuos oli Solenis Aquapel 320.

3. Viilupuun kosteuden mittaaminen

Viilupuun on vanerin tapaan sorvatuista viiluista liimaamalla valmistettu rakenteellinen puutuote. Suomessa viilupuun tunnetaan parhaiten kaupallisella Kertopuu-nimellä. Viilupuuta käytetään kaikkeen uudis- ja korjausrakentamiseen ja myös teolliseen käyttöön. Suomalainen viilupuun valmistetaan liimaamalla 3mm paksuista kuusiviiluista siten että viilujen suuntia säätämällä voidaan säätää viilupuun rakenteellisia ominaisuuksia.

Tutkimuksessa verrattiin kolmella eri mittausmenetelmällä saatuja materiaalin kosteusmittaustuloksia. Käytetyt kosteusmittausmenetelmät olivat:

1. Puun kuivatus-punnitusmenetelmä

2. Huokosilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaaminen putkitetusta porareiästä
3. Sähkönjohtavuuteen perustuvan puun piikkimittausmenetelmä

Mittauksia suoritettiin aluksi kahden päivän välein ja myöhemmin mittaustiheys vaihteli saatujen tulosten perusteella. Mittausväliä harvennettiin todettaessa kastumisen tai kuivumisen ollessa hidasta ja päinvastoin. Mittaustapahtumilla pyrittiin selvittämään, miten kosteus tunkeutuu viilupuuhun ja miten kosteus poistuu viilupuusta ajan funktiona. Tutkimuksessa kosteuden raja-arvoksi määritettiin 17-painoprosenttia puun kuivapainosta. 17-painoprosenttia pidettiin turvallisena arvona. Puun katsotaan olevan kostea ja mikrobikasvu mahdollista, kun puun painoprosenttiin perustuva kosteus on yli 18p-% [1].

3.1 Kuivatus-punnitusmenetelmä

Ennalta arvioiden varmin kosteusmittaustulos saavutetaan kuivatus-punnitus menetelmällä, jonka vuoksi muita mittaustuloksia on verrattu kuivatus-punnitus menetelmällä saatuihin tuloksiin. Menetelmässä tutkittavasta koekappaleesta porattiin tulppaporalla näytepalat punnitusta varten. Koepalat jaettiin 9mm paksuihin osiin, jotta levyn kosteusjakauma saataisiin selville. Koepalat punnittiin heti porauksen jälkeen ja kuivattiin uunissa 105°C lämpötilassa, kunnes niiden paino ei enää punnitusten välillä muuttunut. Tämän jälkeen kosteuspitoisuus laskettiin kostean ja kuivan näytteen massan erotuksen ja kuivan näytteen massan suhteena.

Kuivatus-punnitus-menetelmän käyttö työnaikaisessa kosteuden seurannassa on haastavaa, koska rakenteesta porattavat näytepalat on punnitettava ja kuivattava laboratorio-olosuhteissa. Menetelmässä on myös porattava rakennetta rikkovia mittareikiä. Erityisen haitallisia ne ovat rakenteiden liitosalueella, jossa rakenteen kuormitus on suuri.

3.2 Puun suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaus porareiästä

Toiseksi puun kosteusmittausmenetelmäksi valittiin normaalisti betonin suhteellisen kosteuden mittaamisessa käytetty huokosilman suhteellisen kosteuden mittaaminen putkitetuista porarei'istä. Kosteusmittausmenetelmää kuvaavassa RT 14-10984- kortissa esitetyt ohjeet ovat tarkoitettu kiviaineisten rakenteiden mittaamiseen. Menetelmän käytöstä puumateriaalin kosteusmittauksessa on käytettävissä vain hajanaista kokemuseräistä tietoa. Tutkimuksessa selvitettiin menetelmän soveltuvuutta työn aikaiseen kosteusmittaukseen työmaalla. Jokaiseen koekappaleeseen tehtiin porareiät kolmelle eri syvyydelle. Saatuja tuloksia verrattiin kuivatus-punnitus-menetelmällä saatuihin tuloksiin.

Mittaus suoritettiin RT 14-10984- kortissa kuvatulla tavalla käyttäen Vaisalan mittausputkia. Erona oli, että mittaukset suoritettiin koko seurannan ajan samoista mittareistä. Tämä tehtiin käytännöllisten syiden vuoksi. Koekappaleiden olisi oltava suuria, jotta voitaisiin porata uudet mittareit jokaisella mittauskerralla.

Mittaputken pään ollessa suora porareikämittauksella saadut tulokset eivät korreloineet referenssimenetelmänä käytetyn kuivatus-punnitus-menetelmän mittaustulosten kanssa. Tuloksista ei voida arvioida oikeaa kosteuspitoisuutta ulkoilmaolosuhteissa. Syynä tässä on se, että tehdyt porareiät olivat kohtisuorassa viilujen lapepinnan kanssa. Työmaaoloissa käytettävissä oleva poraussyvyuden tarkkuus on niin vähäinen, ettei mittaja voi olla varma onko mittauspinta osin liimakerroksessa. Parempien tulosten saamiseksi mittaputken pää voi olla viisto, jolloin tuloksena saataisiin keskiarvo useamman viilukerroksen huokosilman suhteellisesta kosteudesta.

3.3 Sähkönjohtavuuteen perustuva piikkimittari

Tutkimuksessa käytettiin elektronista puunkosteusmittaria GANN Hydromette BL H 40 ja puuanturia M18. Mittarilla voidaan mitata eri puulajien kosteuspitoisuutta vastusmittausta käyttämällä. Metalliset elektrodikärjet painetaan puuhun poikkisyyden suuntaisesti, jolloin laite mittaa kärkien välissä olevan puun sähkönjohtavuutta. Sähkönjohtavuuteen perustuvien laitteiden toiminta perustuu mitattavan materiaalin sähköisten ominaisuuksien muutoksiin vesipitoisuuden muuttuessa.

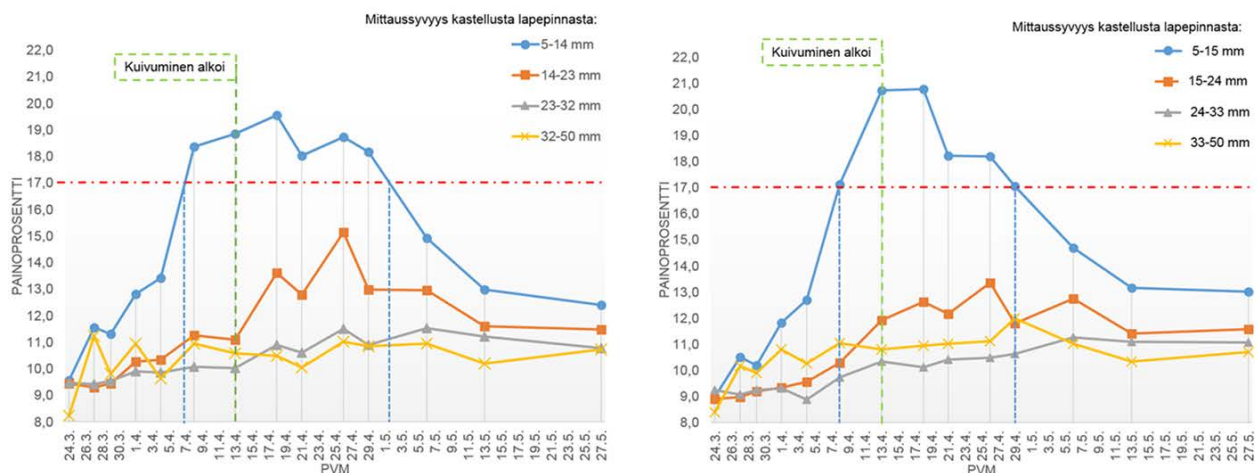
Painettaessa elektrodikärjet syvemmälle puuhun mittaja ei voi olla varma osuvatko elektrodien kärjet liimakerrokseen. Tutkimuksessa mittarin antamat kosteuskäytännöt vaihtelivat saman mittauksen aikana useamman yksikön verran eikä tulos ollut toistettavissa. Piikkimittaus soveltuu ensisijaisesti viilupuulevyn pintaviilujen kosteuden kartoitukseen. Mittausmenetelmä on epäluotettava mitattaessa kosteutta syvemmältä rakenteesta. Viilupuun liimakerrokset vääristävät mittalaitteen antamia mittauksia.

4. Viilupuun kastuminen ja kuivuminen

4.1 Viilupuun kastuminen lapepinnan kautta

Koekappaleita oli säilytetty ulkoilmassa 4 päivää ennen vesirasituskokeen aloittamista ja kokeen alussa koekappaleiden kosteuspitoisuus oli 9,5 painoprosenttia. Ulkoilman lämpötila kokeen aikana vaihteli maaliskuussa ja huhtikuussa 0–12°C välillä. Toukokuussa lämpötila oli 4–17°C välillä.

Tutkittaessa viilupuun kastumista 3 viikon ajan lapepinnan kautta, käsittelemättömien ja hydrofobisella liuoksella pinnoitettujen koekappaleiden viisi ensimmäistä viilua (15mm) kastuivat yli 17-painoprosentin raja-arvon. Pinnoitettu kappale ylitti 17-painoprosentin raja-arvon noin 2 päivää käsittelemättömää nopeammin, mutta käytännössä kastuminen voidaan pitää lähes yhtä nopeana. Käsittelemättömän viilupuun kuivuminen on hieman nopeampaa kuin hydrofobisella liuoksella pinnoitetun viilupuun kuivuminen. Hydrofobisella liuoksella ei ollut suurempaa vaikutusta kastumis- ja kuivumisaikoihin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lapepinta ei anna sivelymenetelmällä pinnoitettaessa liuoksen imeytyä tasaisesti ja muodostaa yhtenäistä kalvoa.



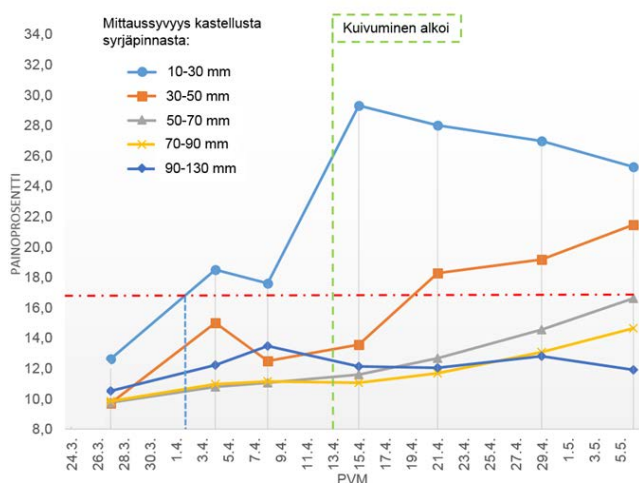
Kuvat 2 ja 3. Pinnoitetun ja käsittelemättömän lapepinnan kastuminen ja kuivuminen.

Kosteusrasituksen alettua käsittelemättömien koekappaleiden pintakerros (viisi pintaviilua) kastui 17 paino-% kosteuteen 15 vuorokauden kuluessa. Kastumisvaiheen loppuun mennessä kosteuspitoisuus oli noussut noin 21 paino-%:iin. Viilupuun kuivumista arvioidessa koekappaleiden pintakerros kuivui 17 paino-%:iin 16 vuorokaudessa. 4 viikon jälkeen kuivumisen alkamisesta koekappaleen kosteuspitoisuus oli palannut lähelle lähtötasoa. Pinnoitettujen koekappaleiden osalta kastuminen raja-arvoon asti tapahtui 13 vuorokaudessa ja kuivumisen alettua raja-arvon saavuttamiseen kului 18 vuorokautta.

4.2 Syrjäpinnan pintavesiupotus ja lapepinnan kastelurasitus

Viilupuun kastumista syrjäpinnan kautta tutkittiin 2,5 viikon ajan. Käsittelemättömien 130mm korkeiden koekappaleiden läpikastuminen oli tapahtunut ensimmäiseen kosteusmittaukseen mennessä eivätkä ne ehtineet kuivua tutkimusajan puitteissa.

Hydrofobisella liuksella pinnoitetuissa koekappaleissa vesi imeytyi korkeintaan 50mm syvyyteen. Ensimmäiset 30mm kastellusta pinnasta ylittivät 17-painoprosentin raja-arvon viidessä päivässä, tästä kosteusprosentti jatkoi nousuaan 12 päivän ajan kosteusrasituksen poistoon asti. Kosteusrasituksen poistumisen jälkeen viilupuun pintakerros (0–30mm) alkoi kuivua tasaisesti ja samaan aikaan syvemmällä rakenteessa (30–70 mm) kosteuspitoisuuden kasvaminen jatkui. Kuuden päivän kuluttua kosteusrasituksen poistumisesta myös 30–50 mm syvyydessä ylittyi 17 paino-% raja-arvo. Johtopäätöksenä on, että hydrofobinen pinnoite estää puun kuivumista kahteen suuntaan ja kosteus siirtyy koekappaleen kuivan päädyn suuntaan. Koekappaleet eivät ehtineet kuivua tutkimusajan puitteissa.



Kuva 4. Hydrofobisella liuksella pinnoitetun syrjäpinnan kastuminen ja kuivuminen.

Kastelurasituksessa olleet kappaleet pysyivät kuivina koko kasteluosuuden ajan. Kosteuspitoisuus ei noussut 12-painoprosenttia korkeammaksi eikä pinnoitteella ollut vaikutusta tuloksiin.

5. Viilupuisen rakennuksen kosteudenhallinnan erityispiirteet

Lapepintojen kautta kastuminen on hidasta ja pintaviilut kuivuvat nopeasti. Liimakerrokset hidastavat merkittävästi pintaviilua syvemmältä kastuneen viilupuun kuivumista. Yhtenäisiä lapepintoja ei ole tarpeen suojata. Kosteudenhallinnassa on tärkeää, että lapepinnalla päässyt vesi poistetaan mahdollisimman nopeasti. Vesi voidaan poistaa vaakapinnalta esimerkiksi lastaamalla.

Viilupuurakenne kastuu nopeasti syrjä ja päätypintojen kautta. Kuivuminen syrjä ja päätypintojen kautta on hidasta. Syrjä- ja päätypinnat on suositeltavaa suojata veden imeytymisen estävällä pinnoitteella. Vesivahingon sattuessa hydrofobinen pinnoite rajoittaa veden imeytymistä syvemmälle rakenteeseen. Kosteuden hallintaa suunniteltaessa tulee veden pääsy rakenteiden liitosten ja saumojen alueelle estää. Viilupuurakennusta suunniteltaessa tulee välttää rakenneosien välisiä huonosti tuulettuvia kapeita ilmarakoja sekä umpinaisia kotelorakenteita, joita ei voida tarkastaa.

6. Yhteenveto

Tutkimuksen yhteydessä kokeiltiin kolmea eri mittausmenetelmää viilupuun kosteuspitoisuuden määrittämisessä. Todettiin, että viilupuun sisällä olevat liimakerrokset vääristävät merkittävästi sähkönjohtavuuteen perustuvien mittalaitteiden (piikkimittari) antamia tuloksia. Piikkimittari on kuitenkin käyttökelpoinen mittalaitte pintaviilujen kosteuden kartoitukseen. Porareikämittauksen todettiin olevan toimimaton menetelmä, kun mittaputken pää on suora ja ulkoilman olosuhde vaihtelee. Tarvittaessa täsmällisiä kosteuspitoisuuksia syvemmältä rakenteesta on kosteusmittaus tehtävä kuivatus-punnitus-menetelmällä, jossa puumateriaalista otetaan halutulta syvyydeltä kappale puuta ja määritetään alkuperäisen ja uunissa kuivatetun kappaleen massan eron perusteella kappaleessa olleen veden määrä.

Ulkoilmaolosuhteissa tehdyillä tutkimuksilla määritettiin, miten viilupuun kastuu ja kuivuu lape-, syrjä- ja päätypinnoilta ajan funktiona. Todettiin, että viilupuun kastuminen on nopeaa syrjä- sekä päätypintojen kautta ja kuivuminen hidasta. Lapepinnan kautta viilupuun kastuminen on hitaampaa. Viilupuun pinnat kuivuvat nopeasti, mutta viilupuun kastuessa pintaviiluja syvemmältä materiaalin kuivuminen on hidasta. Liimakerrokset hidastavat merkittävästi viilupuun kuivumista. Tästä johtuen syrjä- sekä päätypintojen, saumojen ja rakenneliitosten suojaus on tärkeää. Lapepintojen kastuminen ei ole ongelmallista, kunhan vesi ei lammikoidu pitkäksi aikaa.

Lähdeluettelo

- [1] Pesonen, R. ja Karnaattu, R. 2012. Piilevien kosteusvaurioiden aiheuttamat terveyshaitat, selvittäminen terveydensuojelulain mukaisilla asunnontarkastuksilla. Opinnäytetyö. Kuopio: Itäsuomen yliopisto.

B4. Sisäilman haitta-aineet

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyyppisen uudisrakennuksen sisäilmassa sekä uusien kalusteiden vaikutus sisäilman VOC-tuloksiin

Pirita Suortamo ja Sanna Lappi
Sirate Oy, Jyväskylä

Tiivistelmä

Tutkimuksessa todettiin, että hyvällä suunnittelulla ja materiaalivalinnoilla sekä laadukkaan rakentamisen ja hyvän ilmanvaihdon avulla on mahdollista päästä matalaan TVOC-tasoon myös uudisrakennuksessa. TVOC-pitoisuudet olivat luovutuksen jälkeen pääosin 30–100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kalustaminen nosti tasoa selvästi, noin 70 %, mutta kahden kuukauden kuluttua tästä taso oli laskenut ollen $\leq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Seurattujen tilojen TVOC-taso vakiintui yhden vuoden jälkeen tasolle 10–50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, riippuen tilasta. Työssä havainnointiin niin rakennusmateriaaleista, kalusteista kuin käyttäjien toiminnastakin tulevia emissioita.

Tutkimuksessa mukana olleet kaksi säilytyskalustetta tuulettuivat hieman eri tavoin: toisen VOC-emissiot pienenevät selvästi jo kahden ensimmäisen kuukauden aikana, toisen kohdalla taso puolittui noin puolessa vuodessa. Kalusteiden materiaalit olivat M1-luokiteltuja ja niiden emissiot olivat jo tutkimuksen alkuvaiheessa matalalla tasolla. Kalusteen sisältä mitatut yhdisteet näkyivät, riippuen mm. yhdisteen haihtuvuudesta, myös saman tilan sisäilmanäytteessä. Pienen toimistohuoneen sisäilman ja kalusteen sisältä otetun näytteen kokonaispitoisuuksien välillä voitiin havaita korrelaatio.

1. Johdanto

Tutkimuksen lähtökohdaksi oli uudisrakennuksen laadunseurannan ulottaminen rakennusajan lisäksi myös kahteen ensimmäiseen käyttövuoteen: tällä pyrittiin varmistamaan rakennushankkeen tekninen onnistuminen, mutta myös se, että tilat ovat terveelliset ja turvalliset käyttää alusta lähtien. Yhtenä osana ensimmäisten käyttövuosien seuranta olivat sisäilman VOC-mittaukset. Tavoitteena oli seurata niin rakennusmateriaaleista, tiloihin tuotavista uusista kalusteista, kuin myös mahdollisesti käyttäjien toiminnasta aiheutuvia VOC-päästöjä eli emissioita.

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC't vaikuttavat osaltaan sisäilman laatuun. On huomattavaa, että niiden lähteitä on useita, kuten rakennusmateriaalit ja kalusteet, pesuaineet ja muut kemikaalit, käyttäjien toiminta, talotekniset järjestelmät sekä ulkoilma. Samalla yhdisteellä on usein monia eri lähteitä. Myös rakennuksen fysikaaliset olosuhteet kuten lämpötila ja kosteus vaikuttavat emissioiden määrään, samoin rakennuksen koko ja ilmanvaihto. Rakennusmateriaalien päästöt pienenevät yleensä ensimmäisen käyttövuoden kuluessa, mutta sisäilman VOC-taso vakiintuu yleensä viimeistään kahden vuoden kuluessa rakennuksen tai peruskorjauksen valmistumisesta [1].

Viimeisten vuosien aikana rakennus- ja kalustemateriaalien emissiot ovat pienentyneet, mihin on vaikuttanut osaltaan materiaalien M-luokitusjärjestelmä [2] sekä hyvät rakentamiskäytänteet. Viite- ja ohjearvoja on laskettu aiemmasta tasosta: sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa

545/2015 määritettiin asunnon ja muiden oleskelutilojen TVOC'n toimenpiderajaksi $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sekä yksittäiselle yhdisteelle $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [3]. Neljälle yhdisteelle on määritetty erillinen, matalampi, toimenpideraja. Asetus korvasi asumisterveysohjeen, jossa TVOC'n viitearvo oli ollut $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Viime vuonna TTL julkaisi uudet tavanomaisten työympäristöjen viitearvot, jotka perustuivat vuosina 2013–2015 analysoituihin näytteisiin: TVOC'n viitearvoksi määriteltiin $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [4]. Lisäksi yhteensä neljällekympmenellekahdelle yhdisteelle määritettiin oma, yhdistekohtainen, viitearvonsa. Näitä viitearvoja sovelletaan aikaisintaan kuuden kuukauden kuluttua töiden valmistumisesta.

2. Uudisrakennuksen VOC-seuranta

Tutkimuskohteena oli Suomen Yliopistokiinteistöt Oy'n Jyväskylään rakennuttama uudisrakennus Ruusupuisto, johon valmistui tiloja Jyväskylän yliopistolle opetus- ja toimistotyötä varten. Hanke toteutettiin Terve Talo-periaatteella ja valitut rakennusmateriaalit ja kalusteet olivat vähäpäästöisiä. Rakennus luovutettiin toukokuun 2015 lopussa: kesä 2015 oli varattu kalustamiselle ja tuulettumiselle, käyttäjät muuttivat tiloihin syyskuusta 2015 alkaen.

Tutkimuksessa oli mukana kymmenen etukäteen valittua tilaa eri puolilta rakennusta: ne oli valittu siten, että mukana oli eri tyyppisiä ja eri kokoisia tiloja: seminaarisaleja, työhuoneita ja monitilatyöympäristöjä, kokoontumisiin tarkoitettuja aulatiloja sekä porraskäytävä.

Ensimmäiset näytteet otettiin pian luovutuksen jälkeen ts. kesäkuussa 2015. Tämän jälkeen, kesällä 2015, tilat kalustettiin ja seuraavat näytteet otettiin elokuussa 2015, jotta voitiin nähdä kalusteiden vaikutus sisäilman pitoisuuksiin. Kolmannet näytteet otettiin lokakuussa, ts. käyttäjien muuton jälkeen – tällöin rakennuksen valmistumisesta oli kulunut noin neljä kuukautta. Näytteet otettiin siten, ettei tiloissa ollut käyttäjiä paikalla, näin haluttiin vähentää mahdollisia päästölähteitä. Loput näytekierrokset ajoittuivat tammikuulle 2016 sekä noin vuoden (kesäkuu 2016) ja kahden (kesäkuu 2017) päähän rakennuksen valmistumisesta.

Elokuulta 2015 lähtien otettiin myös näytteet kahden kalusteen sisältä, samaan aikaan kyseisten tilojen sisäilmanäytteenottojen kanssa.

2.1 Sisäilman VOC-pitoisuudet

TVOC tulokset olivat varsin maltillisella tasolla ensimmäisellä mittauskierroksella, ts. pian luovutuksen jälkeen: taso vaihteli $30\text{--}150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ollen pääsääntöisesti tasolla $30\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (taulukko 1, kuva 1). Siten suurin osa tuloksista alitti TTL'n TVOC-viitearvon jo tässä vaiheessa, vaikka viitearvoja ei yleisesti sovelleta vielä näin aikaisin. Yleisiä yhdisteitä olivat mm. 2-metyylibutaani, terpeenit kuten α -pineeni ja 3-kareeni, alkoholit kuten bentsyylialkoholi ja 1,2-propaanidioli, jotkin eetterit, aldehydit kuten bentsaldehydi, sekä muun muassa asetoni. Yleisimpiä yksittäisiä yhdisteitä eivät tässä tutkimuksessa olleet aromaattiset yhdisteet, kuten aikaisemmin on todettu [1]. Porraskäytävän näytteen korkea tulos, $580 \mu\text{g}/\text{m}^3$, johtui kiinni olevasta korvausilmasäleiköstä, mikä korostaa osaltaan oikeanlaisen ilmanvaihdon merkitystä.

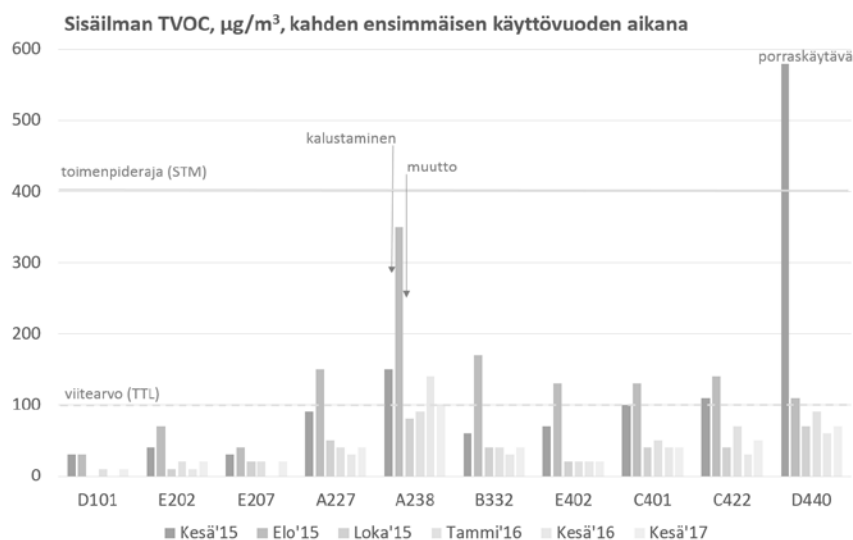
Kalustaminen nosti pitoisuuksia selvästi: TVOC-taso oli elokuussa $30\text{--}350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pääosin $70\text{--}170 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Keskimäärin taso nousi noin 70 %. Yksittäisistä yhdisteistä mm. joidenkin terpeenien, alkoholien, eettereiden ja aldehydien, kuten heksanaalin, pitoisuudet kasvoivat, samoin esimerkiksi kaprolaktaamin ja heksaani- eli kapronihapon pitoisuudet. Seitsemän tilan TVOC ylitti TTL'n viitearvon, mikä oli odotettua: olihan kyse epätavanomaisesta käyttötilanteesta ja

uudisrakennuksesta. Yksittäisten yhdisteiden osalta viitearvojen oli useita, eniten bentsyylialkoholin ja bentsaldehydin kohdalla. Toimistotiloissa lisäksi myös a-pineenin, heksanaalin ja pentanaalin kohdalla: ko. yhdisteet ovatkin tyypillisiä puupohjaisille kalusteille, joita tuotiin toimistoihin suhteessa muita tiloja enemmän. Kahden eri toimistoympäristön, A2 ja C4, tuloksia verratessa voidaan havaita A2'n tilojen tulosten kasvaneen hieman enemmän. Syynä tähän voivat olla erityyppiset tai eri erästä peräisin olevat kalusteet tai toisaalta ilmanvaihdon tehokkuus.

Seuraavien kahden kuukauden kuluessa uudet kalusteet pääsivät tuulettumaan ja lokakuussa 2015 otettujen seurantanäytteiden TVOC-taso oli $\leq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mikä alittaa jo tässä vaiheessa, neljän kuukauden kuluttua valmistumisesta, TTL'n TVOC-viitearvon. Yksittäisten yhdisteiden kohdalla ylityksiä oli kaikkinaensa vain muutama, eivätkä ylitykset olleet suuria. Siten myös yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet olivat pienentyneet selvästi. Käyttäjien muutto tiloihin ei näkynyt tuloksissa: käyttäjiä olikin ohjeistettu etukäteen, mitä esineistöä tiloihin on lupa tuoda. Esimerkiksi vanhoja kalusteita ei tiloihin tuotu lainkaan.

Taulukko 1. Sisäilman TVOC-tulokset, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nro	Käyttötarkoitus	Lattiamateriaali	Kierros					
			kesä'15	elo'15	loka'15	tammi'16	kesä'16	kesä'17
			0 kk	2 kk	4 kk	8 kk	12 kk	24 kk
D101	seminaarisali	parketti	30	30	<10	10	<10	10
E202	käytävä, aula	kumimatto	40	70	10	20	10	20
E207	seminaarisali	kumimatto	30	40	20	20	<10	20
A227	monitilatyöympäristö	tekst.matto	90	150	50	40	30	40
A238	työhuone	tekst.matto	150	350	80	90	140	100
B332	hiljentymishuone	tekst.matto	60	170	40	40	30	40
E402	käytävä, aula	kumimatto	70	130	20	20	20	20
C401	monitilatyöympäristö	tekst.matto	100	130	40	50	40	40
C422	työhuone	tekst.matto	110	140	40	70	30	50
D440	porraskäytävä	mosaiikkibetoni	580	110	70	90	60	70



Kuva 1. Sisäilman TVOC-tulokset.

Tämän jälkeen tapahtui pääasiassa tuulettumista, mutta myös joidenkin tulosten kasvua. Tuloksissa havaittiin myös kokonaan uusia yhdisteitä, tämä johtui pitkälti käyttäjien omasta toiminnasta: tiloihin tuotiin vähitellen lisää tavaroita, mm. loppuvuodesta 2015 lisää

sisustustuotteita sekä käyttäjien henkilökohtaista esineistöä. Esimerkiksi työhuoneen A238 TVOC lähti kasvuun tammikuun näytekierroksella ja jatkoi kasvuaan tämän jälkeenkin. Kasvu johtui käyttäjän tilassa säilyttämien tavaroiden emissioista.

Seminaarisaleissa ja aulatiloissa taso oli sekä vuoden että kahden vuoden mittauksissa $\leq 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja vastaavasti rakennuksen kulmissa eli nopissa sijaitsevien toimistotilojen taso oli pääosin 40–50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet olivat pääosin hyvin pieniä jo ensimmäisen vuoden jälkeen.

2.2 Tulokset kalusteiden sisältä

Kalusteiden sisältä otetuille näytteille ei ole olemassa viitearvoja, mutta työssä haluttiin nähdä, millaista tasoa uusien kalusteiden tulokset ovat ja kuinka pitoisuudet muuttuvat ajan myötä. Lisäksi tuloksia haluttiin verrata vastaaviin sisäilmanäytteisiin. Tutkitut kalusteet olivat saman tyyppisiä, mutta hieman eri mallia, ja sijaitsivat erityyppisissä tiloissa: pieni työhuone (9 m²) ja iso monitilatyöympäristö (> 100 m²). Näytteet otettiin kalusteiden sisältä yhtä aikaa sisäilmanäytteiden kanssa siten, että kalusteiden ovet olivat suljetut. Mitattuja tuloksia ei voi verrata materiaalien M-luokituksen emissiotestauksen tuloksiin.

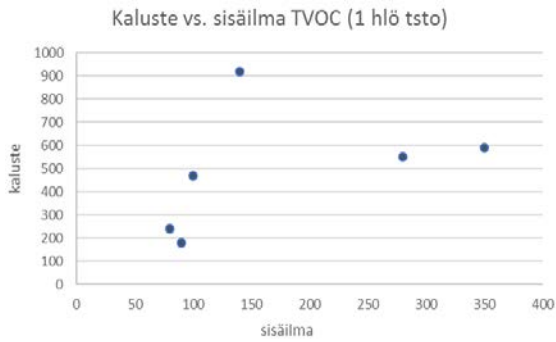
Taulukko 2. TVOC-tulokset kalusteiden sisältä otetuista näytteistä, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tila	Käyttötarkoitus	Kierros					
		kesä'15	elo'15	loka'15	tammi'16	kesä'16	kesä'17
		0 kk	2 kk	4 kk	8 kk	12 kk	24 kk
A238	työhuone (1 hlö)	-	590	240	180	920	470
C401	monitilatyöympäristö	-	670	580	310	350	300

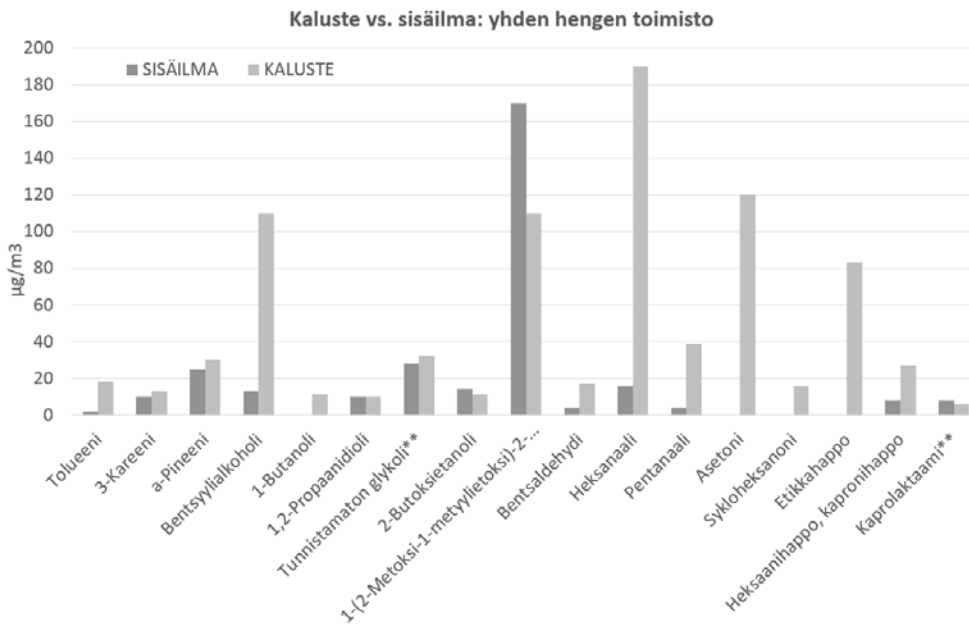
Ensimmäiset näytteet otettiin pian kalustamisen jälkeen elokuussa 2015. Aikaisempiin kokemuksiin verrattuna TVOC-taso oli varsin kohtuullinen: 590–670 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (taulukko 2). Tämän jälkeen tilan A238 kaluste tuulettui varsin nopeasti, TVOC enemmän kuin puolittui kahden seuravan kuukauden kuluessa ja jatkoi pienenemistään myös seuraavien neljän kuukauden kuluessa; sama ilmiö näkyi myös yksittäisten yhdisteiden kohdalla. Tämän jälkeen taso nousi selvästi, mikä yhdistettiin kalusteen sisällä säilytettyihin tavaroihin ja vaatteisiin (mm. pesuaineet ja niistä haihtuvat siloksaanit). Myöhemmin taso laski jälleen selvästi: tuloksista voidaan hyvin nähdä käyttäjän vaikutukset VOC-emissioiden määrään. Kuvassa 2 on esitetty pienen toimistohuoneen sisäilman ja kalusteen sisältä otetun näytteen kokonaispitoisuuden korrelaatio ja kuvassa kolme sisäilman ja kalusteen yhdisteiden vertailua. Tutkimuksen alussa suurimpia kalusteen sisältä mitattuja yhdisteitä olivat mm. heksanaali, asetoni, bentsyylialkoholi, etikkahappo, heksaanihappo, a-pineeni ja tunnistamaton glykoli.

Toisen tutkitun kalusteen tuulettuminen eteni huomattavasti hitaammin: monitilatyöympäristössä C401 sijainneen kalusteen taso oli puolittunut vasta noin puolen vuoden kuluttua ensimmäisestä näytteenotosta. Tämän jälkeen tasossa ei tapahtunut suuria muutoksia. Kalusteen sisällä säilytettiin enimmäkseen paperitarvikkeita sekä tavanomaisia toimistotarvikkeita ja se sijaitsi isossa toimistossa, jossa oli paljon kaappeja, pöytiä sekä tuoleja. Toisaalta kuten kuvia 3 ja 4 vertailtaessa voidaan nähdä, myös kalusteista haihtuvien yhdisteiden profiili oli hieman erityyppinen: monitilatyöympäristön kalusteen sisältä mitattuna suurimpia yhdisteitä olivat tutkimuksen alussa heksanaali, pentaanihappo, pentanaali, asetoni, tolueeni, a-pineeni ja etikkahappo. Erot kalusteiden välillä johtunevat kalusteiden erilaisista materiaaleista, pintakäsittelystä sekä kalustelevyjen iästä ja niiden tuulettumisolosuhteista. Lisäksi joidenkin yhdisteiden pitoisuudet olivat tavanomaiseen sisäilmanäytteeseen verrattaessa melko suuria, mikä

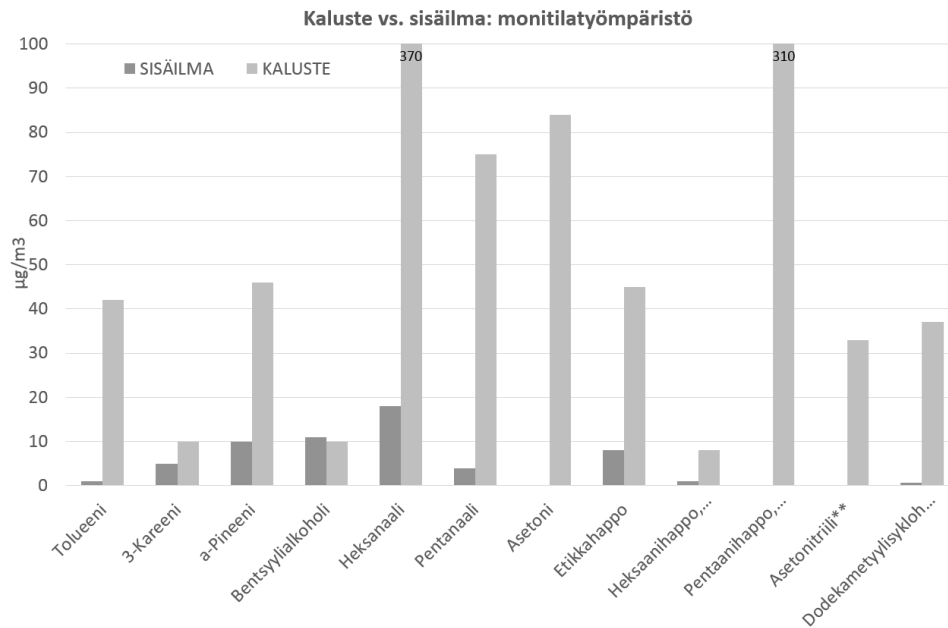
vaikeutti pitoisuuksien tarkkaa analysointia.



Kuva 2. Kalusteen ja sisäilman TVOC-pitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eri mittauskerroilla 9m^2 työhuoneessa.



Kuva 3. Sisäilmasta ja kalusteen sisältä mitattujen pitoisuuksien vertailua työhuoneessa (elo'15).



Kuva 4. Sisäilmasta ja kalusteen sisältä mitattujen pitoisuuksien vertailua avokonttorissa (elo'15). Kaikki tulokset eivät mahtuneet käytetylle y-akselille.

3. Yhteenveto

Tutkitun uudisrakennuksen VOC-emissiot olivat varsin maltillisella tasolla jo heti luovutuksen jälkeen, suurimmassa osassa seurattuja tiloja $\leq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Seuraavat kuukaudet oli varattu sekä rakenteiden että kalusteiden tuulettumiselle, jotta käyttäjien oli hyvä muuttaa tiloihin syksyllä. Vaikka kalustemateriaalit olivat M1-luokiteltuja, nousi tilojen TVOC-taso kalustamisen yhteydessä jonkin verran. Toisaalta emissiot myös laskivat melko pian: heti muuton jälkeen taso oli $\leq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ts. TTL'n viitearvon alle, vaikka rakennuksen luovutuksesta oli kulunut vasta noin neljä kuukautta, eikä ko. viitearvoa yleensä sovelleta näin uusissa tiloissa. Tämän jälkeen pitoisuudet asettuivat seminaari- ja aulatiloihin tasolle $\leq 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja muissa työntekoon tarkoitetuissa tiloissa tasolle $40\text{--}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ensimmäisten kuukausien jälkeen ei siten enää tapahtunut merkittävää tuulettumista.

Toimistotilojen TVOC-taso oli siten keskimääräisesti tarkasteltuna hieman muiden työskentelytilojen tasoa korkeampi, vaikka taso olikin matala. Tilat sijaitsevat rakennuksen kulmissa nk. nopissa – niissä on siten hieman erilaiset rakenteelliset ratkaisut muihin tiloihin nähden, mutta niissä on myös erityyppinen lattiapinnoite. Ero erityyppisten tilojen välillä näkyi erityisesti kalustamisen jälkeen, jolloin toimistotiloihin tuotiin muita tiloja suhteellisesti enemmän puupohjaisia kalusteita.

Tutkitut kalusteet tuulettuivat hieman eri tavoin: toisen emissiot pienenivät merkittävästi kahden ensimmäisen kuukauden, toisen kuuden ensimmäisen käyttökuukauden aikana. Tähän ovat todennäköisesti vaikuttaneet useat seikat, kuten hieman erilaiset kalustemateriaalit ja mahdollisesti niiden ikä, erityyppiset tilat ja siten tilan erilainen ilmanvaihto sekä esimerkiksi kalusteiden määrä suhteessa tilan kokoon. Pienemmässä toimistotilassa kalusteesta haihtuvien yhdisteiden pitoisuudet näkyivät selvemmin myös sisäilmanäytteen tuloksissa, kuten kuvista kaksi ja kolme voidaan nähdä. Myös kalusteista emittoituvissa yhdisteissä oli eroja: siten ne myös haihtuvat hieman eri tavoin. Myöhemmistä tuloksista pystyttiin näkemään myös käyttäjien vaikutus emissioiden määrään.

Lähdeluettelo

- [1] Salonen, H., Lappalainen, S., Lahtinen, M., Holopainen, R., Palomäki, E., Koskela, H., Backlund, P., Niemelä, R., Pasanen, A-L., Reijula, K. 2011. Toimiston sisäilmaston tutkiminen. Työterveyslaitos 2011.
- [2] Rakennustietosäätiö. 2015. M1-luokitus. Ohje M1-luokituksen hakemiseen ja tuoteryhmittelyyn: Rakennusmateriaalit, Kiintokalusteet, Toimistohuonekalut. Rakennustietosäätiö RTA/LS/10.2.2015.
- [3] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.
- [4] Valtanen et al. Työpaikkojen sisäilman VOC-viitearvojen päivitys. Sisäilmastoseminaari 2016. SIY Raportti 34. s. 359–363.

Korjattujen ja korjaamattomien lattiarakenteiden pitkäaikaisseurannan oirekyselyjen tuloksia

Pertti Metiäinen¹ ja Helena Mussalo-Rauhamaa²

¹ Aalto-yliopisto

² Helsingin yliopisto

Tiivistelmä

Asuntojen lattiarakenteiden materiaalipäästöjä on mitattu ja asukkaiden oireita kysely vuosina 1999-2015. Tutkimuksessa selvitettiin korjattujen ja korjaamattomien lattiarakenteiden aiheuttamia muutoksia sisäilman VOC-pitoisuuksiin ja asukkaiden kokemiin oireiluihin pitkällä aikavälillä. Tuloksista voitiin todeta, että käytetty korjaustapa oli päästöjen vähennyksen kannalta yhdistekohtainen (TXIB tai 2-etyyli-1-heksanoli).

TXIB-kohteissa pitoisuudet ja oireilu vähenivät nopeasti korjausten jälkeen. Myös korjaamattomissa kohteissa pitoisuudet ovat laskeneet 12-15 vuodessa normaali tasolle.

2-etyyli-1-heksanolikohteissa pitoisuudet laskivat hitaammin korjausten jälkeen eivätkä korjaamattomien kohteiden pitoisuudet ole laskeneet riittävästi. Oirekyselyissä näkyi selvästi ero asuntojen sisäilmapitoisuuden toimenpiderajan ylittäneiden tai alittaneiden välillä.

1. Johdanto

TXIB:tä käytettiin aiemmin yleisesti PVC-muovimatoissa pehmittimenä, viskositeetin alentajana, nykyään sitä käytetään lisäaineena eräissä maaleissa. Eri tutkimuksissa on havaittu sisäilman tavanomaista korkeamman TXIB-pitoisuuden yhteys ärsytysoireisiin sekä lääkärin toteamien uusien astmatapausten välillä [2-5]. Ammoniakki ja emäksinen kosteus hajottavat PVC-muovimatoissa olevaa DEHP (bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti eli DOP eli dioktyyliftalaatti) pehmitintä aiheuttaen makeahkon hajuisen 2-etyyli-1-heksanolipäästön [6]. STM:n asumisterveysasetuksessa (545/2015) on annettu toimenpiderajat sekä TXIB- että 2-etyyli-1-heksanolipitoisuuksille sisäilmassa. Toimenpideraja on molemmille yhdisteille 10 µg/m³ (tolueeniekvivalentteina) [7].

Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen käyttämät toimenpiderajat olivat ennen uutta asetusta aluksi korkeammat: 2000-luvun taitteessa 50 µg/m³ (yhdisteen omalla vasteella), jota tiukennettiin noin vuoden välein ensin 30 µg/m³ (yhdisteen omalla vasteella) ja sitten 15 µg/m³ (yhdisteen omalla vasteella). 2000-luvun taitteesta ovat peräisin myös tutkimuksen korjaamattomat kohteet, joiden pitoisuudet olivat nykykäsityksen mukaan kohonneet ja jotka olisi kuulunut korjata [1]. Lähes kaikki korjaustarpeessa olleet lattiat korjattiin samalla tavalla. Lattiakorjaukset tehtiin seuraavasti: vanha muovimatto poistettiin ja liima hiottiin pois, asunnon lämpötilaa nostettiin ja ilmanvaihtoa tehostettiin parin viikon ajan ennen uuden muovimaton asentamista M1 luokan materiaaleilla.

Pitkäaikaisseurannassa selvitettiin korjattujen kohteiden tilanne noin 12-15 vuotta korjausten jälkeen. Muutamien korjaamattomien kohteiden tilanne selvitettiin vastaavasti. Asunnoista

mitattiin ilmanvaihto sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet sisäilmassa. Sisäilmamittaukset tehtiin 51 asunnossa kahdesta huoneesta keräämällä sisäilmaa näyteputkiin (Tenax TA absorbenttiin). Kohde- ja verrokkiyhtiöiden asukkaille lähetettiin kyselylomakkeet 217 huoneistoon. Vastaus saatiin 111 huoneistosta eli vastausprosentti oli 51 %, 215 asukasta vastasi kyselyyn. Tutkimuksen rahoitti ympäristöministeriön Kosteus- ja hometalkoot.

2. Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu

Tutkimustulokset esitetään yhdistekohtaisesti TXIB- ja 2E1H-kohteiden mukaisesti jaoteltuina, koska korjausten jälkeinen päästöjen pieneneminen on erilaista.

Asukkaiden kyselylomakkeissa oli kysymys lattiarakenteiden korjauksista. Vastauksissa näkyi selvästi, etteivät uudet sisään muuttaneet asukkaat tienneet vuosikymmenen takaisista korjauksista mitään. Myös jotkut iäkkäämmät pitkäaikaiset asukkaat olivat saattaneet unohtaa korjauksen.

Oirekyselyjen tuloksissa alimmaisella rivillä on ”ei oireita” eli asukkaalla ei ole mitään viikoittaista oiretta. Tämän pitäisikin olla korjaamisen tavoite, että korjauksella saadaan sisäympäristö kuntoon eikä asukkaalle jää jatkuvia, viikoittain esiintyviä oireita.

2.1 TXIB-kohteiden tutkimukset

Ensimmäiset Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen TXIB-kohteiden tutkimukset tehtiin vuonna 2000. Seurantatutkimuksen kohteina olivat aiemmissa tutkimuksissa mukana olleita taloyhtiöitä, VOC-mittaukset tehtiin sellaisissa asunnoissa, joista ne oli mitattu aiemmin (taulukko 1).

Taulukko 1. Perustietoja tutkimuksessa mukana olleista taloyhtiöistä.

	Kohdetaloyhtiöt	Verrokkitaloyhtiö
Rakennusten valmistumisvuosi	1994	1995
Asuntojen lukumäärä	139	59
Asuntojen lukumäärä mittauksessa	24 (17%)	8 (14%)
Ilmanvaihtojärjestelmä	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	Koneellinen poisto-ilmanvaihto + tuloivv.
Lattianpäällyste	PVC-muovimatto	PVC-muovimatto

2.1.1 Sisäilmatekijöiden mittaustuloksia

Sisäilmatekijöiden mittaustuloksia on esitetty taulukoissa 2a-b. Sisäilman TXIB-pitoisuudet on ilmoitettu yhdisteen omalla vasteella (SIM). Metropolilab Oy:n muuntokerroin omasta vasteesta tolueeniekvivalenteiksi on 0,7 ja mittausepävarmuudeksi on arvioitu +/- 30%.

Taulukko 2a. Kohde- ja verrokkitaloyhtiöiden sisäilmatekijät 1. mittauksella.

Sisäilmatekijä	Kohdetaloyhtiöt (24)				Verrokkitaloyhtiö (8)	
	Korjattavat (16)		Korjaamattomat (8)		Mediaani	V-väli
	Mediaani	V-väli	Mediaani	V-väli		
Iv-kerroin (1/h)	0,50	0,2 - 0,8	0,50	0,3 - 1,2	0,50	0,3 - 0,6
TVOOC (µg/m³)	380	120- 2600	280	100 - 380	505	190 - 620
TXIB (µg/m³)	67	30 - 199	29	14 - 43	10	6 - 21

Taulukko 2b. Kohde- ja verrokkitaloyhtiöiden sisäilmatekijät noin 12-15 vuoden jälkeen 1. mittauksesta.

Sisäilmatekijä	Kohdetaloyhtiöt (24)				Verrokkitaloyhtiö (8)	
	Korjatut (16)		Korjaamattomat (8)			
	Mediaani	V-väli	Mediaani	V-väli	Mediaani	V-väli
Iv-kerroin (1/h)	0,50	0,3 - 1,1	0,40	0,3 - 0,6	0,50	0,3 - 0,6
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	175	74 - 579	129	49 - 414	184	78 - 484
TXIB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4	1 - 21	3	1 - 16	4	1 - 20

Korjatuissa kohteissa mediaanipitoisuudet pienenevät murto-osaan jo 6-12 kk korjausten jälkeen ja sen jälkeen hitaammin. Korjaamattomien kohteiden ja verrokkien mediaanipitoisuudet pienenevät myös ajan myötä alhaiselle tasolle [1].

2.1.2 Oirekyselyjen tuloksia

Taloyhtiöiden asukkaiden taustatietoja on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Asukkaiden taustatietoja.

	Lkm (N)	Ikä vuotta	Tupakoijia	All. nuha	Astma	Kotieläimiä
Kohdeyhtiöt						39 %
Nainen	60	19 - 87	17 (28 %)	13 (22 %)	5 (8 %)	
Mies	41	17 - 83	19 (46 %)	13 (32 %)	5 (12 %)	
Lapsi	32	0 - 16		9 (28 %)	2 (6 %)	
Verrokkiyhtiö						41 %
Nainen	25	29 - 77	4 (16 %)	5 (20 %)	4 (16 %)	
Mies	20	20 - 81	3 (15 %)	4 (20%)	2 (10 %)	
Lapsi	1	12				

Kohdeyhtiöissä oli enemmän lapsia ja tupakoijia kuin verrokkiyhtiössä. Verrokkiyhtiön naisilla oli puolestaan enemmän lääkärin toteamaa astmaa. Kotieläimet olivat yhtä yleisiä molemmissa yhtiöissä.

Taulukko 4. Kolmen viime kuukauden aikana viikoittain esiintyneiden oireiden ilmaantuvuus (%).

Oire	Kohdetaloyhtiöt				Verrokkitaloyhtiö			
	Naiset	Miehet	Aikuiset	Lapset	Naiset	Miehet	Aikuiset	Lapset
Väsymys	27	22	35	19	32	25	29	
Päänsärky	20	20	20	9	0	0	0	
Pää raskas	17	20	18	6	4	0	2	
Limannousu	10	17	13	9	4	10	7	
Silmäoireet	27	17	23	6	20	10	16	
Nenän ärs.	28	27	28	13	12	25	18	
Nenän vet.	22	25	23	9	4	5	4	
Kurkkuoire	8	17	12	3	4	5	4	
Käheys	3	10	6	3	0	5	2	
Yskä	2	20	9	6	4	0	2	
Kasv. Pun.	13	12	13	13	20	0	11	
Kasv. Kuiv.	23	10	18	16	16	0	9	
EI OIREITA	33	49	40	47	60	50	56	100

Kohdeyhtiöissä oireiltiin hieman enemmän kuin verrokkiyhtiössä, korjausten vaikutus ei näkynyt tuloksissa. Myöskään toimenpiderajan ylitystapaukset (vain 3 kpl) eivät erottuneet joukosta.

2.2 2-etyyli-1-heksanolikohteiden tutkimukset

Yleisin Pohjoismaissa 2000-luvun alkupuolella käytetty PVC-muovimaton pehmitin oli DEHP (bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti eli DOP eli dioktyylyftalaatti), jota muovimatoissa oli usein jopa 30 painoprosenttia. Tuoreessa kosteassa betonissa tai Portland sementtiä sisältävässä tasoitteessa on korkea pH, joka voi laukaista hajoamisreaktion muovimatoissa ja liimassa [1].

Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen 2-etyyli-1-heksanolitutkimukset tehtiin vuonna 2002 Taulukkoon 5 on kerätty muutamia perustietoja 2-etyyli-1-heksanolitutkimuksessa olleesta taloyhtiöstä.

Taulukko 5. Perustietoja 2-etyyli-1-heksanolitutkimuksessa olleesta taloyhtiöstä.

		Kohdetaloyhtiö
Rakennusten valmistumisvuosi		2000
Asuntojen lukumäärä		19
Asuntojen sisäilmamittauksessa	lukumäärä	19 (100%)
Ilmanvaihtojärjestelmä		Koneellinen poisto-ilmanvaihto + korvausilmaventtiilit
Lattianpäällyste		PVC-muovimatto (M1)

2.2.1 Sisäilmatekijöiden mittaustuloksia

Sisäilmatekijöiden mittaustuloksia on esitetty taulukossa 6a-b. Sisäilman 2E1H-pitoisuudet on ilmoitettu yhdisteen omalla vasteella (SIM). Metropolilab Oy:n muuntokerroin omasta vasteesta tolueeniekvivalenteiksi on 1,0 ja mittaasepävarmuudeksi on arvioitu +/- 30%.

Taulukko 6a. Kohdetaloyhtiön sisäilmatekijät 1. mittauksella.

Sisäilmatekijä	Kohdetaloyhtiö (19)			
	Korjattavat (10)		Korjaamattomat (9)	
	Mediaani	V-väli	Mediaani	V-väli
Iv-kerroin (1/h)	0,50	0,3 - 0,9	0,50	0,4 - 0,8
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	450	200- 1750	425	190 - 700
2E1H ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27	21 - 53	12	8 - 17

Taulukko 6b. Kohdetaloyhtiön sisäilmatekijät noin 13 vuoden jälkeen 1. mittauksesta.

Sisäilmatekijä	Kohdetaloyhtiöt (19)			
	Korjatut (10)		Korjaamattomat (9)	
	Mediaani	V-väli	Mediaani	V-väli
Iv-kerroin (1/h)	0,50	0,3 - 0,6	0,50	0,3 - 0,6
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	325	177 - 890	233	119 - 810
2E1H ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8	1 - 21	9	2 - 26

Lattiakorjauksilla onnistuttiin vähentämään sisäilman 2-etyyli-1-heksanolipitoisuuksia noin puoleen ennen korjausta vallinneesta tilanteesta. 2-etyyli-1-heksanolipitoisuudet laskevat hitaammin kuin TXIB-pitoisuudet. Korjausten jälkeisissä FLEC-mittauksissa todettiin, että betonilaatasta haihtunut 2-etyyli-1-heksanoli adsorboitui varsinkin ruiskutasoitettuun kattopintaan välivarastoksi. Asukkaiden terveyden tilassa ei raportoitu suuria muutoksia 6-12 kk korjausten jälkeen. Asunnon sisäilman laadun koettiin kuitenkin parantuneen selvästi/hieman yli puolessa korjatuista asunnoista [1].

2.2.2 Oirekyselyjen tuloksia

Taloyhtiöiden asukkaiden taustatietoja on koottu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Asukkaiden taustatietoja.

	Lkm (N)	Ikä vuotta	Tupakoijia	All. nuha	Astma	Kotieläimiä
Kohdeyhtiö						56 %
Nainen	17	17 - 61	3 (18 %)	5 (29 %)	3 (18 %)	
Mies	11	24 - 64	2 (18 %)	3 (27 %)	1 (9 %)	
Lapsi	8	8 - 16		3 (38 %)	4 (50 %)	

Lääkärin toteamien lasten astmatapausten määrä oli korkea.

Taulukko 8. Kolmen viime kuukauden aikana viikoittain esiintyneiden oireiden ilmaantuvuus (%) vuonna 2015 ja (2002).

Oire	Kohdetaloyhtiö 2015 (2002)			
	Naiset	Miehet	Aikuiset	Lapset
Väsytys	47 (71)	27 (44)	36 (61)	13 (38)
Päänsärky	6 (57)	18 (11)	11 (39)	19 (13)
Pää raskas	6 (50)	9 (67)	7 (57)	0 (13)
Limannousu	24 (29)	9 (11)	18 (22)	38 (25)
Silmäoireet	24 (71)	9 (44)	18 (61)	25 (38)
Nenän ärs.	24 (71)	18 (67)	21 (70)	25 (44)
Nenän vet.	24 (43)	9 (33)	18 (39)	25 (31)
Kurkkuoire	29 (64)	18 (11)	25 (44)	25 (38)
Käheys	18 (50)	9 (11)	14 (35)	13 (31)
Yskä	18 (21)	9 (0)	14 (13)	38 (31)
Kasv. Pun.	12 (36)	0 (11)	7 (26)	25 (25)
Kasv. Kuiv.	18 (64)	9 (33)	14 (52)	25 (50)
EI OIREITA	45	63	54	50

Kohdetaloyhtiön asukkaiden viikoittainen oireilu on tulosten valossa vähentynyt merkittävästi 13 vuodessa.

Taulukko 9. Oireiden ilmaantuvuus (%) jaoteltuna makuuhuoneen 2E1H-pitoisuuden mukaan sisäilmassa.

Oire	MH Sisäilman 2E1H-pitoisuus < 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				MH Sisäilman 2E1H-pitoisuus > 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Naiset	Miehet	Aikuiset	Lapset	Naiset	Miehet	Aikuiset	Lapset
Väsytys	17	17	17	0	54	40	50	33
Päänsärky	0	17	8	0	9	20	13	33
Pää raskas	0	17	8	0	9	0	6	0
Limannousu	33	17	25	20	18	0	13	66
Silmäoireet	17	0	8	20	27	20	25	33
Nenän ärs.	17	17	17	20	27	20	25	33
Nenän vet.	17	0	8	20	27	20	25	33
Kurkkuoire	33	17	25	20	27	20	25	33
Käheys	17	0	8	20	18	5	13	33
Yskä	17	17	17	20	18	0	13	66
Kasv. Pun.	17	0	8	20	9	0	6	33
Kasv. Kuiv.	17	0	8	20	18	0	19	33
EI OIREITA	50	83	67	80	18	40	25	0

Asukkaiden oireilu oli yleisempää, kun makuuhuoneen sisäilman 2E1H-pitoisuus ylitti toimenpiderajan $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verrattuna toimenpiderajan alittaneisiin. Korjausten vaikutus ei näkynyt nykyisissä tuloksissa, koska sekä osa korjatuista ja korjaamattomista oli alle tai yli toimenpiderajan.

3. Yhteenveto

TXIB-kohteiden korjausten osalta käytetty korjaustapa on ollut onnistunut, pitoisuudet pienenevät heti korjausten valmistuttua merkittävästi ja vähensivät asukkaiden oireilua. Pitoisuudet vähenivät edelleen vuosien mittaan ja lähestyvät nyt normaalitilannetta.

Suuri osa 2E1H-kohdeyhtiön sisäilman 2E1H-pitoisuuksista ylitti asumisterveysasetuksen toimenpiderajan. Tämä osoittaa sen, ettei käytetty korjaustapa ole ollut riittävän tehokas alentamaan pitoisuuksia vaadittavalle tasolle. Vaikka asukkaiden oireilu on pienentynyt 13 vuodessa, niin toimenpiderajan ylittäneissä asunnoissa asukkaiden oireilu on selvästi yleisempää kuin alittaneissa.

Lähdeluettelo

- [1] Metiäinen, P., Korjattujen lattiarakenteiden pitkäaikaisseuranta, Loppuraportti 31.10.2015. Kosteus- ja hometalkoot, ympäristöministeriö 2016.
- [2] Metiäinen, P., Mussalo-Rauhamaa, H. ja Viinikka, M., TXIB-päästöt terveyshaittojen indikaattorina. Sisäilmastoseminaari 2001, Espoo 14.-15.3.2001, SIY Raportti 15; 117-121
- [3] Metiäinen, P., Mussalo-Rauhamaa, H. ja Viinikka, M., TXIB-emission from floor structure as a marker of increased risk for some specific symptoms, Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate -Indoor Air 2002. Santa Cruz 2002.
- [4] Villberg K., Saarela K., Tirkkonen T., Pasanen A-L., Kasanen J-P., Pasanen P., Kalliokoski P., Mussalo-Rauhamaa H., Malmberg M. ja Haahtela T., Sisäilman laadun hallinta, VTT publications 540, Espoo 2004.
- [5] Villberg, K.; Mussalo-Rauhamaa, H.; Haahtela, T.; Saarela, K., Prevalence of plastic additives in indoor air related to newly diagnosed asthma, Indoor and Built Environment. Vol. 17 (2008) No: 5, 455 – 459
- [6] Aikivuori A., Terveen rakennuksen evoluutio, VTT julkaisuja, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 2001.
- [7] STM:n asetus 545/2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.

Onko sisäilmaongelmat ymmärretty oikein?

Janne Liimatainen ja Gunnar Laurén
Saint-Gobain Finland Oy / Weber

Tiivistelmä

Sisäilmaongelmien kirjo on tätä nykyä mitä moninaisain ja vaikeasti hahmotettavissa. Kosteudenhallinta on saanut korostuneen roolin ongelmien estämisessä, mutta kaikkiin ongelmiin ei ole saatavissa ratkaisua materiaalien kosteusrajoja tiukentamalla. Lattiarakenteiden osalta ollaan tultu tilanteeseen, jossa alkaa olla tarve ottaa huomioon materiaalien yhteensopivuus ja kehittää tarpeelliset luokittelumenettelyt.

Lattiapäällysteiden hajoamiseen liittyvät sekundääriset emissiot syntyvät alkalisen hydrolyysin reaktiotuotteina. Tämä johtuu yhteensopimattomien materiaalien ts. betonin ja PVC-muovimatton liimaamisesta yhteen päällekkäisiksi rakennekerroksiksi. Alkalisen hydrolyysin käynnistyminen voidaan estää suojaamalla päällyste matala-alkalisella tasoitekerroksella betonin ja päällysteen välissä sekä huolehtimalla asianmukaisesta kosteudenhallinnasta. Sekä sekundääristen emissioiden että rakennekosteuden mittaamiseen kohteessa on kehitetty rakennetta rikkomattomia menetelmiä, joilla rakennuksen kosteus- ja emissioprofiilia voidaan tarkkailla rakennuksen käyttöä häiritsemättä.

1. Johdanto

Tässä artikkelissa keskitytään sekundääristen emissioiden muodostumiseen ja siinä mielessä turvallisten lattiarakenteiden reunaehtoihin. Sekundäärisiin emissioihin liittyvien sisäilmaongelmien selvittäminen on tyypillisesti pitkä prosessi, joka ainakin käyttäjätaholle on vaikea ymmärtää. Systemaattinen lähestyminen olisi tarpeen myös tällä rakentamisen alueella. Asiallisen kosteudenhallintasuunnitelman tulisi sisältää myös osio, jossa otetaan kantaa sekundäärisiin emissioihin liittyvistä rakenneratkaisuista ja käytönaikaisesta monitoroinnista.

2. Sementtipohjaisten rakennusmateriaalien kuivuminen

Sisäilmaongelmien käsittelyssä kosteudenhallinta on saanut merkittävimmän yksittäisen tekijän aseman. Kosteuden liikkeiden ja vaikutusten ymmärtäminen onkin terveellisen rakentamisen keskiössä, vaikka myös kuiva rakenne saattaa olla ongelmallinen. Hyvänä esimerkkinä kosteudenhallinnan edistämisestä toimii Oulun rakennusvalvonnan ja Ympäristöministeriön Kuivaketju10-hanke, jossa keskitytään oleellisimpien tunnistettujen kosteusriskien torjuntaan. Hanke on tuottanut kymmenkohtaisen riskilistan, jonka läpikäymällä pureudutaan kosteusongelmiin useasta näkökulmasta.

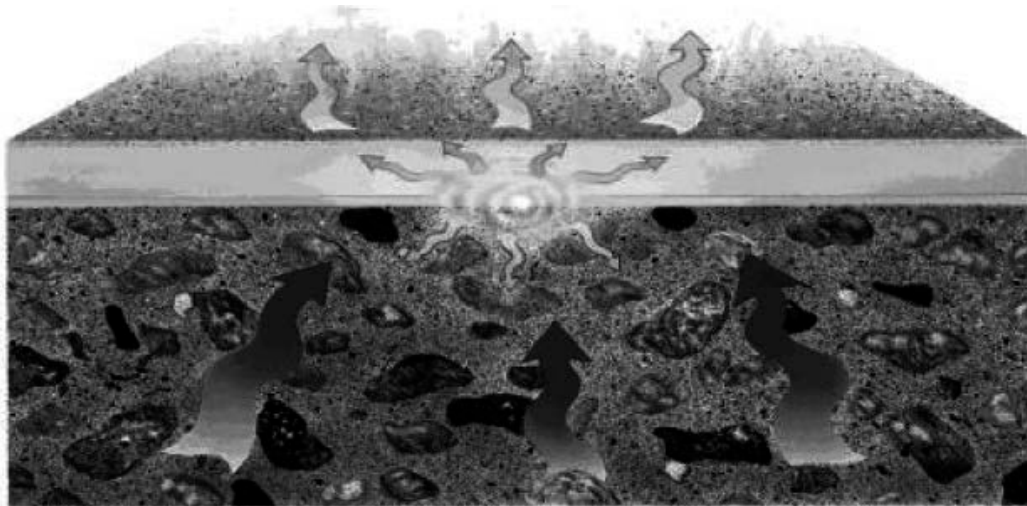
Sementtipohjaisten rakennusmateriaalien osalta rakenteen kuivuminen tapahtuu joko haihduttamalla vesi ulos rakenteesta tai sitomalla se sementtireaktioihin. Kuivumisnopeuteen vaikuttavat ympäröivät olosuhteet, materiaalin kemiallinen koostumus ja siihen sekoitettavan veden määrä. Vallitsevat kuivumisolosuhteet määräävät, kuinka paljon ilmatila voi ottaa vastaan rakenteista haihtuvaa kosteutta. Myös ilmanvaihto kuuluu oleellisena osana kuivumisolosuhteisiin.

Sideaineiden ja veden määrä sekä sideaineiden koostumus määrittelevät, kuinka paljon vettä sitoutuu kemiallisesti rakenteeseen. Jäljelle jäävä ylimääräinen sekoitusvesi täytyy haihduttaa pois rakenteesta ennen pinnoitusta. Mikäli kaikki sekoitusvesi kuluu ajan myötä sideainereaktioissa, kuivumisolosuhteista tulee käytännössä merkityksetön tekijä. Kastumaan rakenne ei toki saa päästä.

3. Päälystämisen ohjeistus

Betonirakenteiden päälystämisen ohjeet määrittelevät, millaisia vaatimuksia eri pinnoitevaihtoehdot asettavat ja kuinka mittaukset tulee toteuttaa. Vastaavanlaisia ohjeita on käytössä myös kansainvälisesti. Näitä ohjeita yhdistää se, että ne kaikki lähestyvät päälystämistä ainoastaan kosteusrajojen näkökulmasta sivuuttaen samalla päälystevaurioiden syntymisen kannalta oleellisia ilmiöitä. Toisin sanoen tiukentamalla kosteuden raja-arvoja ei poisteta kaikkia päälystevaurioita puhumattakaan sisäilmaongelmista [1]. Kosteusvaikutuksen ohella alustan liian korkea pH on erityisen merkittävä tekijä.

Muovimattopäälysteiden kohdalla emäksisyys johtaa päälysteen kemialliseen hajoamiseen alkalisen hydrolyysin seurauksena. Kiinnittämiseen käytettävien liimojen ja muovimaton pehmentimien kemiallinen rakenne on altis tälle korkeassa pH:ssa käynnistyvälle hajoamisreaktiolle. Sisäilmaongelmien (SBS) esiintyminen onkin enenevässä määrin liitetty rakenteellisiin ongelmiin. Käytännössä kyse on usein välittömästi betonille liimattujen lattiapäälysteiden vaurioitumisesta ja tässä yhteydessä alkalisen hydrolyysin (kuva 1) seurauksena haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (VOC). Betonirakennetta päälystettäessä tulee ymmärtää, mitkä materiaalit siihen soveltuvat. Nykyinen M1-luokitukseen perustuva emissioiden arviointi ei ota kantaa rakenteen materiaalien yhteensopivuuteen.

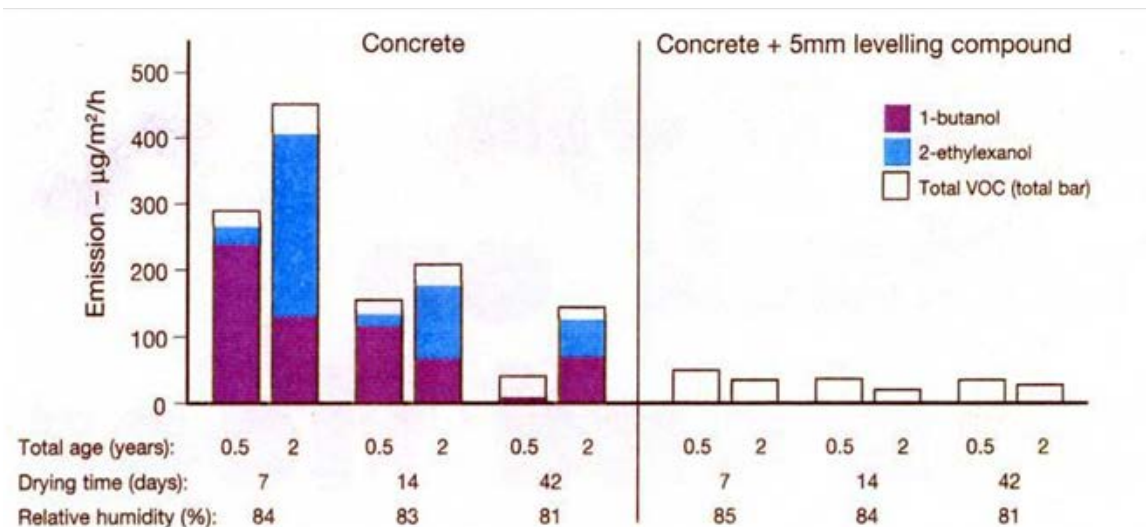


Kuva 1. Sekundääristen emissioiden synty betonin ja päälysteen rajapinnassa [2].

4. Sementtipohjaisten rakennusmateriaalien ja muovimattojen yhteensopivuus

Julkisrakentamisessa rakenne, jossa betonin päälle liimataan PVC-matto, on hyvin yleinen kestäväytensä ja helpon asennettavuutensa vuoksi. Mikäli PVC-matto liimataan suoraan betonille, rakenne tuottaa alkalisen hydrolyysin seurauksena ajan myötä huoneilmaan

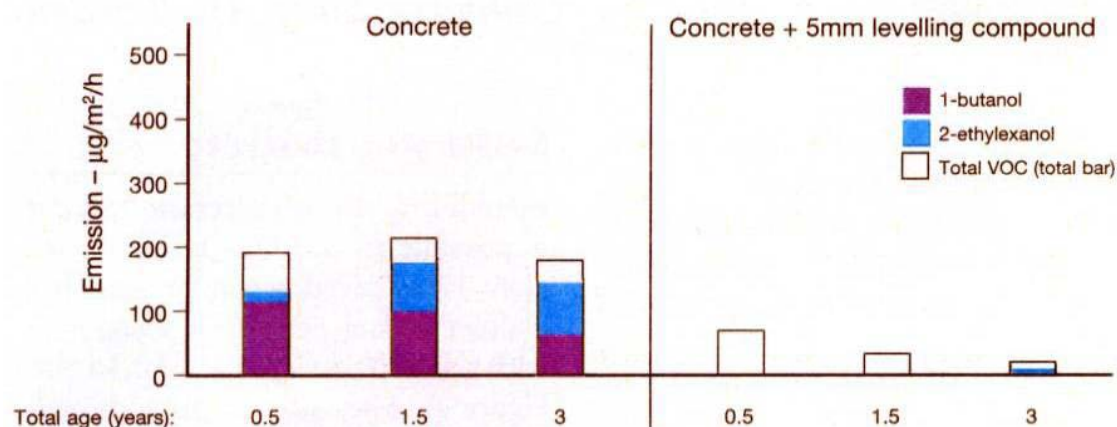
sekundäärisiä emissioita (kuva 2), jotka ovat tyypillisesti käytetyille materiaaleille ominaisia alkoholeja.



Kuva 2. Alkalisen hydrolyysin merkkiaineet ja matala-alkalisen tasoitteen suojavaikutus [3].

Alkalinen hydrolyysi voidaan estää käyttämällä matala-alkalista tasoitetta betonin muovimaton välissä [3]. Betonin emäksisyydeltä suojaavan tasoitekerroksen toimivuuden (kuva 2) kannalta on merkityksellistä, että tasoitteen pH < 11, tasoitekerros on vähintään 5 mm paksu ja ettei betonin ja tasoitteen välille muodostu jatkuvaa vesikerrosta.

Pelkkä kosteudenhallinta ei siis riitä estämään haitallisia sisäilmapäästöjä lattiarakenteista, koska alkalinen hydrolyysi ei ole sidonnainen mihinkään tiettyyn kosteustasoon (kuva 3) rakenteissa ja ilmatilassa [3]. Kosteutta toki tarvitaan reaktion etenemiseen, mutta sillä on vaikutuksensa vain reaktionopeuteen. On tarpeellista huomata, että huoneilma ja siten myös rakenteen huokokset sisältävät aina jonkin verran kosteutta.



Kuva 3. Nopeasti kuivuvan betonin vaikutus sekundäärisiin emissioihin [3]. Ko. betonin RH oli 70% pinnoitushetkellä.

5. Mittaukset ja monitorointi työmaolosuhteissa

Haitallisten sisäilmapäästöjen analysoiminen kenttäolosuhteissa asettaa käytettäville menetelmille ja tulosten tulkinnalle erityisiä haasteita. Kvantitatiivisuuteen pyrittäessä olosuhteiden vaikutus

mittauksiin tulee luonnollisesti eliminoida. Sen sijaan rakennuksen käyttöönottovaiheen emissioiden seurannassa voidaan tarkkuusvaatimuksista tinkiä, kunhan kokonaiskuvan selvittämisen kannalta riittävä tarkkuus saavutetaan.

Alkalinen hydrolyysi voidaan todeta analysoimalla tyypillisiä merkkikemikaaleja (esim. 2-etyyliheksanoli) käyttäen FLEC menetelmää [4]. Menetelmässä näytteenotto tapahtuu lattian pinnalta, josta ilmaa imetään adsorboivan reagenssin läpi. Lopulta näytteestä analysoidaan merkkikemikaalit kaasukromatografisesti verraten kokonaispäästöihin.

Näytteenotoltaan yksinkertaisemmassa PFS-menetelmässä (Passive flux sampling) [5,6] näyte kerätään asettamalla näytteenotin (kuva 4) tutkittavan rakenteen pinnalle 24 tunnin ajaksi. Muilta osin näytteen käsittely ja analysointi vastaa FLEC menetelmää. Myös tulosten on todettu vastaavan FLEC-menetelmällä saatuja tuloksia, vaikka näytteenotossa on teoreettisesti lopputulokseen vaikuttava ero. PFS-menetelmän etuja ovat selvästi pienemmät kustannukset ja huomattavasti helpompi näytteenotto [6]. Yksittäisten mittausten sijaan oleellisempaa on seurata merkkikemikaalien pitoisuuksien kehitystä ja osuutta kokonaispäästöistä (TVOC) ajan myötä.



Kuva 4. PFS-näytteenottaja [6].

Rakennuksen käytön aikaiset määritykset tulisi tehdä rakenteita rikkomattomilla menetelmillä jo käyttömukavuus- ja kustannussyistä. Oleellisia kartoitettavia suureita ovat ainakin lattiarakenteen kosteus ja sekundääriset emissiot. Kosteusmittausmenetelmistä RT-kortin 38796 mukainen rakennetta rikkomaton menetelmä vastaa tähän tarpeeseen. Kosteusmääritykset voidaan tällöin toteuttaa ja dokumentoida nopeasti rakennuksen käyttöä häiritsemättä.

6. Yhteenveto

Rakenteiden kosteustaseen ja materiaalien asettamien kosteusraamien ymmärtäminen on välttämätön perusta terveellisen sisäilman aikaansaamiseksi. Kosteudenhallinnalle asetettavien vaatimusten tulee olla sellaisia, että ne eivät tarpeettomasti hidasta rakentamisen prosessia. Liioitteluun ei tule kosteudenhallinnassakaan sortua vain riittävän syvällisen tiedon puuttumisen

vuoksi. Jotta näin voi olla, tulee rakennusmateriaalien keskinäiset yhteensopivuudet selvittää. Myös luokitusmenettelyä tulee kehittää rakenteiden testaamisen suuntaan, jotta yhteensopimattomista materiaaliyhdistelmistä päästään eroon.

Yhteensopimattomat materiaaliyhdistelmät tulee voida eliminoida markkinoilta, koska niiden aiheuttamien ongelmien korjaaminen on yksinkertaisesti liian kallista ja lasku lankeaa lopulta rakennuksen käyttäjän maksettavaksi huolimatta siitä, missä vaiheessa ja millä tiedoilla tai vaikuttimilla sisäilmaongelmiin johtaneet väärät päätökset on tehty.

Lähdeluettelo

- [1] Kristina Nordling Mjörnell, *Self-Desiccation in Concrete*, CTH, Institutionen för byggnadsmaterial, 1994
- [2] Sjöberg A. *Secondary emissions from concrete floors with bonded flooring materials. Effects of alkaline hydrolysis and stored decomposition products*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, 2001. (Publication P-01:2)
- [3] Alexandersson J. *Secondary emission from alkali attack on adhesives and PVC floorings*, Lund University, Division of Building Materials, 2004
- [4] NT Build 484. *BUILDING MATERIALS: EMISSION OF VOLATILE COMPOUNDS – On-site measurements with Field and Laboratory Emission Cell (FLEC)*. Nordtest, 1998.
- [5] Kai Y., Fujiib, M., Kumagaic, K., Shinoharac, N. & Yanagisawac, Y. 2003. *A new method to measure emission rate of VOCs with passive flux sampler and evaluation of PFS with reference emission material*. Healthy Buildings Singapore 2003.
- [6] Alexandersson J. *Passive flux sampling - a new method for measuring emissions from floor constructions*, Lund University, Division of Building Materials, 2010.

B5. Sisäilman laatu

Rakennusten peruskorjauksessa tai laajennuksessa usein liian vähälle huomiolle jääneitä sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä

Timo Hautalampi
RTC Vahanen Turku Oy

Tiivistelmä

Tämä artikkeli perustuu seitsemässä eri kohteessa tehtyihin sisäilma- ja kosteusteknisiin kuntotutkimuksiin. Kaikissa kohteissa on epäilty olevan sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä tai sisäilman laatuun liittyvää oireilua. Kaikissa näissä kohteissa on tehty ennen tutkimuksia korjauksia tai laajennuksia, joiden puutteellisella toteutuksella on joko ollut sisäilman laatua heikentäviä vaikutuksia, heikentäviä tekijöitä ei ole huomioitu tai onnistuttu korjaamaan.

Kohteet eivät edusta tavanomaista rakennuskantaa, koska kaikissa kohteissa on vähintäänkin epäilty olevan sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä tai sisäilman laatuun liittyvää oireilua. Tässä artikkelissa ei pyritä luettelemaan kaikkia mahdollisia sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä, vaan tarkoitus on keskittyä muutamaankin seikkaan, joita ei kohteissa tehtyjen havaintojen perusteella oteta riittävästi huomioon rakennusten peruskorjauksessa tai laajennuksessa.

Kohteissa tehtyjen havaintojen perusteella peruskorjauksessa tai rakennusten laajennuksessa tulisi kiinnittää nykykäytäntöä merkittävästi enemmän huomiota laajennusosien ja vanhempien rakennusosien liittymiin, ilmapuotoihin rakenteiden kautta ja palvelutyypisten rakennusten valesokkelirakenteisiin. Lisäksi todettiin, että suunnittelun lähtötietoihin ja tarkkoihin riskikohtien suunnitelmiin tulisi kiinnittää enemmän huomiota.

1. Johdanto

Tämä artikkeli perustuu RTC Vahanen Turku Oy:ssä parin viime vuoden aikana tehtyihin sisäilma- ja kosteusteknisiin kuntotutkimuksiin, joista tähän artikkeliin valittiin muutamia julkisissa rakennuksissa tehtyjä tutkimuksia. Kaikissa kohteissa on tehty joko erilaisia peruskorjauksia tai rakennuksiin on rakennettu yksi tai useampia laajennusosia. Eri kohteissa tehdyistä tutkimuksista kerättiin yhteen muutamia keskeisiä tekijöitä, joita huomioimalla saadaan sisäilman laatua parannettua peruskorjauksen ja laajennuksen yhteydessä. Tarkoituksena ei ollut laatia kattavaa listausta kaikista huomioitavista asioista. Artikkelin pohjautuu aiheesta tänä keväänä tehtyyn RTA-opintojen loppuyhteyteen [1].

2. Laajennusosien liittymät vanhoihin rakenteisiin

Yhtä tutkimuskohdetta lukuunottamatta kaikkia muita tutkimuskohteita oli laajennettu. Laajennusten liittymien kohdalla todettiin monenlaisia ongelmia. Liittymien kohdalla todettiin mm. koholla olevia rakennekosteuksia, korjaamattomia kosteusvaurioita ja ilmapuotoja rakenteiden kautta.

Laajennusten yhteydessä ovat liittymien kohdalla olleet vanhat ulkoseinät muuttuneet väliseiniksi. Vanhan ulkoseinän rakenteissa voi olla ulkoseinässä normaaliksi katsottavaa mikrobikasvua (esimerkiksi tuulensuojan ulkopinnalla), mutta jonka ei voi katsoa olevan hyväksyttävää ollessaan

suorassa ilmayhteydessä sisäilmaan.

Laajennusten kohdalla uuden ja vanhan osan liittymien tarkka suunnittelu jää tutkimuskohteissa tehtyjen havaintojen perusteella usein tekemättä kokonaan tai tulee tehtyä puutteellisesti ja liittymien toteutus ratkaistaan usein työmaalla, jolloin monia sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä jää vaille riittävää huomiota. Laajennusosan höyryn- tai ilmansulun liittymiä vanhoihin rakenteisiin ei tästä johtuen useimmiten toteuteta riittävän tiiviisti.



Kuvat 1 ja 2. Vanhaa valesokkelirakennetta entisen ulkoseinän kohdalla. Seinärakenteen kautta todettiin suora ilmayhteys alapohjan leca-sorakerrokseen.

Seinärakenteiden kautta tapahtuu usein ilmavuotoja esimerkiksi sokkelihalkaisun tai seinän tuuletusraon kautta. Rakennukset ovat useinmiten hieman alipaineisia ja ilmavirtaukset tapahtuvat rakenteesta sisätilojen suuntaan. Vanhoissa rakenteissa saattaa olla esimerkiksi kosteusvaurioita, joista sisäilmaan saattaa päästä mikrobiperäisiä epäpuhtauksia.



Kuvat 3 ja 4. Entinen ulkoseinä on muuttunut laajennuksen yhteydessä väliseinäksi. Seinän rakenteet ovat ennallaan. Valesokkelin eristetilasta tai sokkelihalkaisun eristetilasta (nuolet) todettiin ilmavuotoa huonetilaan päin.

Työmaan aikainen sadesuojaus on voitu tehdä puutteellisesti ja rakennustyön aikana rakenteet pääsevät kastumaan. Tästä huolimatta kohdehavaintojen perusteella esimerkiksi kastuneita eristeitä ei useinkaan vaihdeta eikä kastuneiden rakenteiden mahdollisia vaurioita tarkasteta.

Tutkimuskohteissa todettiin alapohjassa vanhan sokkelirakenteen kohdalla poikkeavaa kosteutta, joka voi johtua esimerkiksi siitä, että vanhan ulkoseinän kohdalla kosteus pääsee nousemaan kapillaarisesti vanhaa sokkelirakennetta pitkin aina alapohjan pintarakenteisiin saakka (esimer-

kiksi muovimatto). On todennäköistä, että salaojien toteutuksessa ja toiminnassa on myös puutteita liittymien kohdilla.

Laajennusosien liittymien toteuttaminen on kohdehavaintojen perusteella haasteellista. Liittymiin pitäisikin kiinnittää aikaisempaa selvästi enemmän huomiota ja liittymien rakennusfysikaalinen toiminta suunnitella tarkasti. Suunnitelmat liittymien kohdalla on suositeltavaa tehdä huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin esimerkkikohteissa on tehty. Rakenteiden kunnan tutkiminen ja vaurioituneiden materiaalien uusiminen on tärkeää ja esimerkkikohteissa havaittiin useissa kohteissa vaurioituneita, uusimatta jääneitä materiaaleja. Liittymien rakennusaikaiseen suojaaminen on myös tehtävä huolella, jotta rakenteet eivät pääse kastumaan rakennustyön aikana.

3. Ilmavuodot rakenteiden kautta sisäilmaan

Ilmavuodot ovat merkittävä tekijä arvioitaessa rakenteissa olevien vaurioiden, haitta-aineiden tai esimerkiksi eristekuitujen merkitystä sisäilman kannalta. Kaikissa esimerkkikohteissa havaittiin ilmavuotoja, joilla oli merkitystä sisäilman laatua merkittävästi heikentävänä tekijänä.

Karkeimmat ilmavuodot voidaan todeta merkkisavulla. Pienempien ilmavuotojen havaitseminen voidaan tehdä esimerkiksi merkkiainetekniikkaa käyttämällä. Ilmavuotojen merkitystä sisäilman laatua heikentävänä tekijänä ei huomioida riittävästi. On edelleenkin yleistä, että ilmavuotojen olemassaolo koetaan hyödyllisenä ”rakenteiden hengittävytenä”. Tällöin ei ymmärretä, että ilmavuotojen mukana sisäilmaan saattaa kulkeutua monenlaisia epäpuhtauksia.



Kuvat 5 ja 6. palvelutalossa tehdyssä merkkiainekokeessa todettiin ilmaa virtaavan alapohjan alta huoneeseen alapohjan ja ulkoseinän liittymästä sekä ulkoseinän pistorasioiden ja ikkunaliittymien kautta.

Ilmavuotojen merkitys korostuu, jos rakenteissa on kosteusvaurioita tai esimerkiksi PAH-yhdisteitä, joista voi kulkeutua epäpuhtauksia sisäilmaan. Peruskorjauksissa tai laajennuksissa ei olevien rakennusten riskirakenteita ja mahdollisia vaurioita tai haitta-aineita tutkita riittävästi, jotta niiden edellyttämät korjaukset osattaisiin suunnitella. Usein vaurioituneiden materiaalien uusiminen ei ole riittävä toimenpide, vaan pitää myös poistaa vaurioiden aiheuttaja tai korjata rakenne rakennusfysikaalisesti toimivaksi. Vaurioiden korjaamisen lisäksi rakenteiden tiivistäminen ilmatiiviiksi on usein tarpeen. Tiivistyskorjausten onnistuminen edellyttää erillistä suunnittelua ja työn valvontaa ja korjauksen onnistumisesta tulee lisäksi varmistua merkkiainemenetelmällä.

4. Palvelutyypisten rakennusten valesokkelirakenteet

Valesokkelirakenteita käytettiin yleisesti pientaloissa 1970- ja 1980-luvuilla. Valesokkelia käytettäessä saadaan rakennus perustettua hyvin matalalle. Usein valesokkelirakenteissa lattia onkin lähes ympäröivän maan pinnan tasalla. Molemmista tutkituissa palvelutalossa oli käytetty riskirakenteeksi jo pitkään tunnistettua valesokkelirakennetta. Toisessa tutkituista palvelutaloista oli valesokkelia käytetty vielä 2000-luvulla toteutetussa laajennuksessa. Molemmista näissä kohdeissa todettiin valesokkelirakenteessa mikrobivaurioita ja rakenteiden kautta ilmavuotoja, joiden mukana saattaa sisäilmaan kulkeutua mikrobiperäisiä epäpuhtauksia.



Kuvat 7 ja 8. Rakenneavauksessa todettiin toisen palvelutalon ulkoseinän puurakenteen jatkuvan alapohjan alle ja alajuoksun sijaitsevan noin 20 cm maanpinnan alapuolella.



Kuvat 9 ja 10. Toisessa palvelutalossa ulkoseinän rakenneavauksessa havaittiin kalkkihärmää valesokkelin taustapinnassa.

Esteettömyyden kannalta rakennusten perustaminen mahdollisimman matalalle on perusteltavissa. Perinteisesti matala perustuskorkeus ympäröivään maanpintaan nähden on toteutettu valesokkelirakennetta käyttäen. Sisäilmanäkökulmasta asiaa tarkasteltuna valesokkelirakenne on kuitenkin selkeä riskirakenne, jota ei pidä käyttää.

5. Puutteelliset lähtötiedot ja suunnitelmat peruskorjauksessa ja laajennuksissa

Kohdehavaintojen perusteella peruskorjaukset tai laajennukset suunnitellaan ja toteutetaan usein puutteellisten lähtötietojen perusteella. Rakennuksessa ei tehdä lainkaan tai tehdään liian pintapuolisia tutkimuksia, jolloin korjaussuunnittelija ei saa riittäviä lähtötietoja korjauksen suunnit-

telua varten. On myös mahdollista, että suunnittelija jättää tutkimustulokset huomioimatta esimerkiksi heikon sisäilmaosaamisensa tai liian lyhyen suunnitteluaikeakaudun ja suunnittelutyön kireän kilpailutuksen takia. Monesti tällöin vain pintarakenteet on uusittu ja mahdollisesti huonejakoja muutettu, mutta rakenteissa olevat vauriot tai muut sisäilman laatua heikentävät tekijät on jätetty kokonaan tai osittain huomioimatta ja korjaamatta. Myös vaurioiden syy jää tällöin usein korjaamatta ja vauriot saattavat uusiutua nopeallakin aikataululla. Saattaa käydä jopa niin, että vaillinaisesti toteutettu peruskorjaus joudutaan osin tai kokonaan uusimaan piankin korjausten valmistumisesta. Kaikkien esimerkkikohteiden aikaisemmissa korjauksissa on jäänyt huomioimatta riittävällä tarkkuudella asioita, jotka nykytietämyksen perusteella olisi pitänyt ottaa huomioon peruskorjausten suunnittelussa ja toteutuksessa.

Riskialttiiden ratkaisujen suunnittelusta mainittakoon esimerkkinä opistoon kellaritiloihin toteutetut sisäpuolelta eristetyt ja levytetyt maanvastaiset seinät ja alapohjan muovimatot sekä puutteellinen ulkopuolisen kosteuden hallinta.

6. Yhteenveto

Tämä artikkeli perustuu sisäilma- ja kosteusteknisiin kuntotutkimuksiin seitsemässä kohteessa, joissa on epäilty olevan sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä tai sisäilman laatuun liittyvää oireilua. Kaikissa kohteissa on tehty ennen tutkimuksia korjauksia tai laajennuksia, joiden puutteellisella toteutuksella on joko ollut sisäilman laatua heikentäviä vaikutuksia tai heikentäviä tekijöitä ei ole onnistuttu korjaamaan. Tässä artikkelissa ei pyritty luettelemaan kaikkia mahdollisia kohteissa havaittuja sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä, vaan keskityttiin muutamaankin seikkaan, joita ei oteta riittävästi huomioon rakennusten peruskorjauksessa tai laajennuksessa.

Laajennusosien liittymissä todettiin monenlaisia ongelmia, jotka liittyivät entisten ulkoseinien muuttumisesta väliseiniksi. Liittymissä ei ole otettu riittävästi huomioon vanhojen ulkoseinien ulko-osien rakenteissa normaaliksi katsottavaa mikrobikasvua, höyryn- tai ilmansulun liittymistä vanhan ja uuden osan välillä sekä vanhojen seinärakenteiden kautta tapahtuvia ilmavuotoja. Liittymissä todettiin alapohjassa vanhan sokkelirakenteen kohdalla poikkeavaa kosteutta. Voidaan todeta, että laajennusosien liittymien toteuttaminen on haasteellista ja esimerkkikohteissa havaittiin puutteita sekä liitosten suunnittelussa että niiden toteutuksessa. Kirjoittajan mielestä olisi suositeltavaa minimoida laajennusosien ja vanhojen rakennusten liitospinta-alat ja liittää rakennukset toisiinsa esimerkiksi käytävien tai portaikkojen avulla. Lisäksi liittymien suunnittelu olisi tehtävä nykyistä tarkemmin.

Ilmavuotoja rakenteiden läpi sisäilmaan esiintyi yleisesti kaikissa tämän artikkelin esimerkkikohteissa. Ilmavuotojen merkitystä sisäilman laatua heikentävänä tekijänä ei huomioida riittävästi. On edelleenkin yleistä, että ilmavuotojen olemassaolo koetaan hyödyllisenä ”rakenteiden hengittävyysnä”. Tällöin ei ymmärretä, että ilmavuotojen mukana sisäilmaan saattaa kulkeutua monenlaisia epäpuhtauksia.

Esimerkkikohteina oli kaksi palvelutyypistä rakennusta, joista molemmissa todettiin valesokkelirakenteessa mikrobivaurioita ja rakenteiden kautta havaittiin ilmavuotoja, joiden mukana saattaa sisäilmaan kulkeutua mikrobiperäisiä epäpuhtauksia. Erityisen merkillepantavaa oli, että myös 2000-luvulla tehdyssä rakenteessa todettiin viiteitä mikrobikasvusta, eli uudehkokakin rakenteessa saattaa olla vaurioita. Esteettömyyden kannalta rakennusten perustaminen mahdollisimman matalalle on perusteltavissa. Sisäilmanäkökulmasta asiaa tarkasteltuna valesokkeli-

rakenne on kuitenkin selkeä riskirakenne, jota ei pidä käyttää. Esteettömyyden vaatimukset on suositeltavaa toteuttaa muilla teknisillä ratkaisuilla.

Esimerkkikohteissa korjauksia edeltävät tutkimukset ovat monin paikoin olleet hyvin puutteellisia tai niitä ei ole tehty lainkaan. Kaikkia ilmeisiäkään tekijöitä ei ole aina otettu korjauksissa huomioon tai ne jäävät toteutusvaiheessa liian vähälle huomiolle. Joissakin kohteissa oli kohteiden korjaussuunnittelussa tehty riskialttiita ratkaisuja. Tästä esimerkkinä opiston kellari-kerroksen maanvastaisten seinien kipsilevyrakenteet ja muovimatto maanvaraisessa lattiassa yhdistettynä ulkopuolisen kosteuden hallinnan puutteisiin.

Kaikissa esimerkkikohteessa oli koettu sisäilmaan liitettävää oireilua kohteissa aikaisemmin tehdyistä mittavistakin korjauksista huolimatta. Sisäilmakorjauksissa on monia erityistä osaamista vaativia tehtäviä ja riskinä on, että jos jossakin osa-alueessa epäonnistutaan, lopputuloskaan ei ole toivottu. Pahimmillaan korjausten ja laajennusten yhteydessä sisäilman laatu heikkenee. Peruskorjattavat tai laajennettavat kohteet tulisi tutkia kohdehavaintojen perusteella nykyistä huomattavasti laajemmilla tutkimuksilla, joissa tehdään aistinvaraisen arvion lisäksi riskirakenteisiin ja aistinvaraisessa arvioinnissa mahdollisesti riskialttiiksi todetuissa kohdissa rakenneavauksia. Varsinkin kohteissa, joissa ei ennen peruskorjausta ole ollut tiedossa sisäilma-ongelmia, on suuri riski siitä, että rakennuksessa ei ymmärretä tehdä kattavia tutkimuksia suunnittelutyön lähtötiedoiksi. Vaikka korjauksia edeltävien tutkimusten kustannus on useinkin hyvin pieni korjausten kokonaiskustannuksiin verrattuna, tutkimuskustannukset halutaan kuitenkin usein minimoida, vaikka riskinä on, että korjaus epäonnistuu ja kustannukset mahdollisessa uudessa korjauksessa ovat huomattavan suuret.

Vauriokorjausten tai vanhojen rakennusten laajennusten suunnittelu edellyttää myös korjaussuunnittelijalta erityistä osaamista, jota ei esimerkiksi uudisrakentamiseen suuntautuneella suunnittelijalla välttämättä ole. Korjaus- tai laajennussuunnitelmat on suositeltavaa tarkastaa asiantuntijan toimesta myös niiden rakennusfysikaalisen toiminnan ja sisäilma-asioiden osalta.

Varsinainen korjaustyö on tehtävä huolellisesti ja korjausten onnistumista edesauttaa, jos niiden tekijä on sisäistänyt, miksi korjauksia tehdään ja mitä niiltä edellytetään. Korjaustyön laadunvalvonta sisäilman laatuun vaikuttavien tekijöiden osalta on myös tärkeä tekijä, johon tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Lähdeluettelo

- [1] Hautalampi, T. 2017. Rakennusten peruskorjauksessa tai laajennuksessa usein liian vähälle huomiolle jääneitä sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä, - Kenttätutkimuksissa tehtyjä havaintoja, RTA-lopputyö, Turku AMK ja Helsingin yliopisto, koulutus ja kehittämisspalvelut, 65 s.

Arviointimenetelmä korjaussuunnitteluratkaisujen vaikutuksista rakennuksen altistumisolosuhteisiin

Veli-Matti Pietarinen, Kai Nordberg, Juha Heikkinen, Liisa Kujanpää ja Helmi Kokotti
Suomen Sisäilmakeskus Oy

Tiivistelmä

Korjaussuunnitteluratkaisujen merkityksestä altistumisolosuhteisiin ei ole ohjeistusta eikä arviointimallia. Työsuojelurahaston rahoittaman hankkeen tavoitteena oli kehittää arviointimenetelmä, jonka lähtökohtana on rakennuksen käyttöikätaavoite ja korjausten jälkeinen altistumisolosuhdetaso. Nämä määrittävät korjausratkaisut sekä laadunvarmistus- ja seurantamenetelmät.

Suunnittelun käyttöä ja tavoiteltavan altistumisolosuhdetason perusteella valituille korjaussuunnitteluratkaisuille sekä niiden laadunvarmistusmenetelmille tehdään kokonaisuuden huomioiva arviointi, jossa otetaan huomioon sekä rakenteiden että ilmanvaihtojärjestelmän korjausratkaisut. Tavoitteena on määrittää kuinka todetun haitan vaikutus on poistettu, mikä on saavutettu altistumisolosuhdetaso ja mitkä ovat korjausratkaisuihin liittyvät riskit. Riskien hallintaan laaditaan seurantasuunnitelma.

1. Johdanto

Rakennusten sekä työ- ja asuintilojen terveellisyydestä säädetään maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999, MRL)[1], laissa maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta (41/2014)[2], terveysuojelulaissa (763/1994)[3] ja sen muuttamisesta säädetyssä laissa (1237/2014)[4] sekä työturvallisuuslaissa (738/2002)[5]. Lakien tavoitteena on varmistaa, että työ- ja oleskelutilat ovat terveelliset ja turvalliset käyttäjille rakennuksen elinkaaren ajan. Rakennukset, joissa on todettu aiheutuvan terveyshaittaa käyttäjille, tulee korjata rakennukselle asetetun käyttöikätaavoitteen ja käyttötarkoituksen mukaisesti tai tilojen käytöstä tulee luopua.

Kosteus- ja mikrobivauriokorjausten suunnitteluvaiheessa on huomioitava korjausratkaisun sisäilman laatuun vaikuttavat mahdolliset riskitekijät, korjausten laadunvarmistus ja onnistumisen seuranta suhteessa korjauksilla tavoiteltavaan käyttöikätaavoiteeseen [6]. Eri rakennusten käyttöikätaavoitteet voivat vaihdella yksittäisistä kuukausista peruskorjauksien kymmeneen vuosiin.

Usein rakennukset vaativat käyttöä turvaavia korjauksia, kunnes tilojen käytöstä luovutaan tai rakennukseen tehdään peruskorjaus. Työsuojelurahaston rahoittaman hankkeen tavoitteena oli kehittää korjaussuunnitteluvaiheen tarkastustyökalu, jonka avulla arvioidaan käyttöikätaavoitteiltaan erilaisten korjaussuunnitteluratkaisujen vaikutusta rakennuksesta johtuviin altistumisolosuhteisiin. Rakennuksen käyttöikätaavoite ja korjausten jälkeinen altistumisolosuhdetaso määrittävät riittävät korjaustoimenpiteet [6].

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Hankkeen korjauskohteet ja tavoitteet

Korjauskohteina oli seitsemän koulurakennusta, joille oli asetettu erilaiset käyttöikätaavoitteet. Taulukossa 1 on esitetty korjauskohteiden taustatiedot.

Taulukko 1. Korjauskohteiden taustatiedot sekä korjausten kohdekohtaiset käyttöikä- ja altistumisolosuhtetavoitteet.

	rakennusvuosi / peruskorjaus	A (brm ²)	laaja-alaiset vauriot	LVI-peruskorjaus	altistumisolosuhde	suunniteltu altistumisolosuhde	suunniteltu käyttöikä (vuosi)
1.	1965 / 2006	3050	AP, US	ei	taso 4	taso 3	alle 1
2.	1985	3630	AP	kyllä	taso 3	taso 1	25 – 30
3.	1985	3250	US, VP	kyllä, IV	taso 4	taso 2	5 – 10
4.	1963 / 1998	2100	YP, US, AP, MVS	ei	taso 4	taso 3	alle 1
5.	1957 / 1998	3400	MVS, AP, YP	ei	taso 2 – 4	Taso 2	1 – 5
6.	1976 / 2009	8400	MVS, AP /TK	ei	taso 3	Taso 2	1 – 5
7.	1953 / 2006	2500	YP, US, VP, AP, MVS	kyllä	taso 4	Taso 1	25 – 30

YP= yläpohjarakenne, US = ulkoseinärakenne, AP = alapohjarakenne, MVS = maanvastainen seinärakenne, VP = välipohjarakenne, TK = talotekniikkakanaali

2.2 Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus

Tutkimuskohteiden kosteus- ja sisäilmatekniset kuntotutkimukset on tehty Ympäristöministeriön julkaisun ”Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus” (2016) ohjeiden mukaisesti [7]. Kuntotutkimuksissa on määritetty rakennusosittain esiintyvät kosteusteknisesti riskialttiit rakenteet, niissä esiintyvät vauriot ja epäpuhtauslähteet sekä niiden laajuus ja vaikutus sisäilman laatuun. Kuntotutkimuksissa on huomioitu ilmanvaihtojärjestelmän toiminta ja puhtaus sekä ilmamäärien riittävyys. Peruskorjattavissa kohteissa on tehty sekä rakennustekniset- että talotekniikkajärjestelmien kuntotutkimukset. Kuntotutkimusten yhteydessä on tehty haitta-ainetutkimukset.

2.3 Altistumisolosuhteiden arviointi

Kaikissa rakennuksissa altistumisolosuhteet on arvioitu kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen [7] perusteella. Altistumisolosuhteiden arviointi on tehty Työterveyslaitoksen ”Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen” (2016) mukaisesti [8], jossa rakennukselle tai sen osille määritetään altistumisolosuhtetasot 1 – 4. Terveysturvallisuuslain [5] nojalla annetun asumisterveysasetuksen [9] mukainen toimenpideraja ylittyy, kun rakennuksen altistumisolosuhde on arvioitu tasolle 3 tai 4. Tällöin kyseessä on laaja-alaisia, rakennusosakohtaisia vaurioita sekä epäpuhtauslähteitä, joista on todettu ilmayhteyksiä sisäilmaan [8].

Asumisterveysasetuksen mukaan asunnon sekä muun oleskelutilan terveydellisiä olosuhteita ja rakennuksessa mahdollisesti esiintyvää terveyshaittaa tulee arvioida kokonaisuutena. Altisteen toimenpiderajaa sovellettaessa on otettava huomioon altistumisen todennäköisyys, toistuvuus ja kesto [8]. Käytännössä tämä tarkoittaa rakennuksen kattavaa kosteus- ja sisäilmateknistä kuntotutkimusta ja sen perusteella tehtävää altistumisolosuhteiden arviointia.

3. Arviointimenetelmä korjaussuunnitteluratkaisujen vaikutuksesta rakennuksen altistumisolosuhteisiin

3.1 Korjaussuunnittelussa työskentelevien asiantuntijoiden pätevydet

Maankäyttö- ja rakennuslain sekä terveydensuojelulain muutosten [2, 4] nojalla annetuissa asetuksissa ja ohjeissa on pätevyysvaatimuksia kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten tutkimus- ja suunnitteluvaiheen asiantuntijoille. Kosteusvaurion tutkimus- ja suunnitteluvaiheen erityisalan nimikkeitä ovat rakennusterveysasiantuntija (RTA) ja sisäilma-asiantuntija (SISA) sekä kosteusvaurion kuntotutkija (KVKT) ja -korjaussuunnittelija (KVKS). Rakennusten asbesti- ja haitta-ainetutkimuksen tekijältä edellytetään Valtioneuvoston asbestityön turvallisuutta käsittelevässä asetuksessa (25.6.2015/789 7§) [10] riittävää perehtyneisyyttä, mikä tarkoittaa sertifioitua asbesti- ja haitta-aine-asiantuntijan (AHA) tai muuta vastaavaa pätevyyttä. Talotekniikkajärjestelmien kuntotutkijalla tulisi olla LVI-tekniikassa tai energiatekniikassa suoritettu tutkinto. Arviointimallissa on esitetty tutkimus-, suunnittelu- ja seurantavaiheesta vastaavien asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksia ja -suosituksia.

3.2 Korjaussuunnittelu

Rakennusten korjaussuunnittelun lähtökohtana on saavuttaa vähintään terveydensuojelulain ja työturvallisuuslain [4, 5] täyttävät työ- ja oleskelutilat. Tällöin asumisterveysasetuksen mukaiset toimenpiderajat eivät ylity ja altistumisolosuhdetaso on pääsääntöisesti tasoa 1 tai 2 [8, 9]. Hankesuunnitteluvaiheessa päätetään tavoiteltava altistumisolosuhdetaso sekä korjauksilla tavoiteltava käyttöikä. Suunnitteluvaiheessa niiden perusteella määritetään korjausratkaisut, laadunvarmistusmenetelmät sekä tilojen käytön aikainen seuranta. Rakennuksen korjauksen onnistuminen edellyttää, että kaikille rakennusosille valitaan käyttöikänsä samantasoiset korjaustoimenpiteet. Ympäristöministeriön asetuksen (216/2015 § 16) mukainen selvitys haitan ja sen vaikutuksen poistamisesta [6] voidaan tehdä soveltamalla hankkeen arviointimallia.

3.3 Sisäilmaryhmän tehtävät korjausten suunnittelussa, laadunvarmistamisessa ja seurannassa

Sisäilmaryhmässä käsitellään rakennuksen käyttäjien havaintoja, kokemia oireita ja olosuhdehaittoja. Käyttäjien kokemien olosuhteiden seurantaan voidaan käyttää joko sisäilmakyselyä tai työterveyshuollon haastattelua. Kyselyllä voidaan arvioida korjausten onnistumista noin vuoden jälkeen korjauksista sekä seurata tilannetta rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa [11].

Kiinteistön omistaja huolehtii ja sisäilmaryhmä valvoo rakennuksen huolto- ja seurantatoimenpiteiden toteutumista. Sisäilmaryhmä laatii viestintäsuunnitelman, jolla varmistetaan asianmukainen tiedonsiirto tilojen käyttäjille [12]. Kiinteistön omistajaa veloitetaan, että suunnitellun käyttöikänsä loputtua varmistetaan rakennuksen käytön turvallisuus uudelleen tai sen käytöstä luovutaan.

Sisäilmaryhmässä tehdään korjausratkaisujen riskiarviointeja. Riskiarviointia ohjaavat kosteusvaurion kuntotutkija ja -suunnittelija. Terveyshaitan mahdollisuutta tulee arvioida uudelleen, jos altistumisolosuhdeluokka on 3 korjausten jälkeen. Terveysuojelulain alaisissa kohteissa terveyshaittaa arvioi terveydensuojeluviranomainen [3, 9]. Työterveyshuoltolain (1383/2001) 12 § perusteella työturvallisuuslain alaisissa kohteissa terveyshaittaa arvioi työterveyshuollon asiantuntija [13]. Arvion perusteella päätetään tilojen jatkokäytöstä. Lyhyen

aikavälin käyttöä turvaavien korjaustoimenpiteiden onnistumista tulee valvoa sisäilmaryhmässä sekä työterveyshuollossa. Tarvittaessa korjaustapaa ja -laajuutta muutetaan tai rakenteiden tiiveystasoa parannetaan tai tilojen käytöstä luovutaan.

3.4 Korjaussuunnitteluratkaisut rakennuksen eri käyttöikätaivoitteisiin

Taulukoissa 2 - 5 on esitetty korjausratkaisuja eri käyttöikätaivoitteisiin, korjausratkaisujen laadunvarmistukseen ja seurantaan. Taulukoissa on esitetty tutkimus-, suunnittelu-, laadunvarmistus- ja seurantavaiheista vastaavien asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksia tai -suosituksia. Taulukon mukaan valituille korjausratkaisuille sekä niihin liittyville laadunvarmistusmenetelmille tehdään kokonaisuuden huomioiva arviointi [6]. Tavoitteena oli määrittää kuinka rakennusosassa todettu haitta tai sen vaikutus on poistettu, mikä altistumisolosuhdetaso korjauksilla saavutetaan ja mitkä ovat korjausratkaisujen onnistumisen riskit. Riskien hallintaan laaditaan seurantasuunnitelma.

Peruskorjauksen korjausratkaisujen pääperiaatteet on esitetty taulukossa 2. Peruskorjauksen lähtökohtana on, että vaurioituneet rakenteet korjataan kosteusteknisesti toimiviksi rakenteiksi ja vauriot poistetaan, jolloin tavoiteltava käyttöikä on 25–30 vuotta ja tavoiteltava altistumisolosuhdetaso on 1 [14]. Rakennusosat pyritään korjaamaan käyttöikänsä samalle tasolle. Rakennusosien paikallisia vaurioita tai epäpuhtauslähteitä voidaan korjata rakenteita tiivistämällä, jos vaurion poistaminen rakenteesta ei ole mahdollista. Tällöin vuotoilmavirtaukset tulee estää rakenteessa olevasta epäpuhtauslähteestä. Samalla rakennuksen tiiveyttä parannetaan, jolloin ilmanvuotoluku pienenee rakentamismääräysten edellyttämälle tasolle [15].

Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty korjausratkaisuja, joilla rakennuksen käyttöikää jatketaan 1–15 vuotta. Korjausratkaisujen tavoitteena on vähentää vuotoilmavirtaukset vaurioituneista rakenteista sisäilmaan. Jos rakenteen sisäpinnoilla tai pintamateriaaleissa on todettu vaurioita, ne tulee poistaa ja materiaalien uudelleen vaurioituminen estää [16]. Tiivistyskorjauksissa vaurioitunut materiaali jää rakenteeseen. Korjauksissa tavoiteltava altistumisolosuhdetaso on tällöin 2.

Alle yhden vuoden käyttöikänsä tähtävissä korjauksissa tavoiteltava altistumisolosuhdetaso on 2 tai poikkeuksellisesti taso 3. Korjauksilla tavoiteltava altistumisolosuhdetaso sekä siihen liittyvät korjausten laadunvarmistus ja korjausten seurantamenetelmät tulee hyväksyttävä sisäilmaryhmällä, työterveyshuollolla sekä tarvittaessa kohteen terveydensuojelulain tai työsuojelulain viranomaisilla. Ennalta määritetty altistumisolosuhdetaso tulee olla hyväksytty tilojen käytön kannalta. Jos kustannustehokkaita käyttöä turvaavia korjaustoimenpiteitä ei ole, suositellaan rakennuksen lyhytaikaisenkin käytön lopettamista. Tarvittaessa terveyden- tai työsuojeluviranomainen voi asettaa rakennuksen käyttökieltoon.

Taulukossa 5 on esitetty korjaustoimenpiteitä rakennuksen lyhytaikaiseen käyttöön (alle yksi vuosi). Korjausten tavoitteena on vähentää vuotoilmavirtauksia rakenteiden epäpuhtauslähteistä. Korjausratkaisuisissa joudutaan usein poistamaan käytöstä tiloja, kerroksia tai koko rakennus. Tavoiteltavana altistumisolosuhdetasona on 2 tai 3.

Taulukko 2. Peruskorjauksen korjausratkaisujen periaatteet. Tavoiteltu alitumisosuhteluokka on 1.

Suunniteltu korjausrakaisu	Vastaaja asiantuntija	Suunnitteluvaiheen laadunvarmistus	Vastaava asiantuntija	Tilojen käytön aikainen seuranta	Vastaava asiantuntija
Rakennusosien peruskorjaus tai -parantaminen kosteusteknisesti toimiviksi rakenteiksi [12]. Rakenteissa olevat vauriot ja haitat poistetaan.	KVKS	Purku- ja korjaustyön riittävän laajuuden varmistaminen. Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.	KVKS, KVKT KVKS	Seurantasuunnitelma rakennuksen huoltokirjaan.	KVKS
Rakennuksen ilmapuotoluku rakentamismääräyksien edellyttämälle tasolle [13].	KVKS				
Jos rakenteissa olevia paikallisia epäpuhtauksia ei voida poistaa, niiden vaikutus sisäilmaan estetään poistamalla ilmayhteys vauriosta sisäilmaan. Tiiveystaso 1 rakenteen koko käyttöiän [14].	KVKS	Tiiveystason varmistaminen [19]. Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys. Materiaalien soveltuvuuden arviointi käyttöikätaivoitteeseen verrattuna.	KVKT, RTA* KVKS KVKS, KVKT, RTA*	Tiiveystason seuranta erillisen suunnitelman mukaisesti. Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKT, RTA* KVKS
Talotekniikkajärjestelmien peruskorjaus, järjestelmien käyttöikätaivoite vastaa rakenteille tavoiteltavaa käyttöikää.	IV, KVV, LVV	Talotekniikkajärjestelmien puhtauden varmistaminen ja käyttöönottotarkastukset.	IV, RTA, SISA	Seurantasuunnitelma rakennuksen huoltokirjaan.	IV, LVV, KVV
Sisäilmastoluokituksen mukainen tavoitetaso sisäilman laadulle.	IV, KVKS	Sisäilmaston laatu luokan todentaminen.	RTA, LVI		

Taulukko 3. Korjausratkaisujen periaatteet, joilla rakennuksen käyttöikää jatketaan 5 – 15 vuotta. Tavoiteltu alituumisolosuhteluokka on 2.

Suunniteltu korjausratkaisu	Vastaaja asiantuntija	Suunnitteluvaiheen laadunvarmistus	Vastaava asiantuntija	Tilojen käytön aikainen seuranta	Vastaava asiantuntija
Laaaja-alaisten / koko rakennusosan haittojen tai vaurioiden vaikutus sisäilmaan estetään, poistamalla ilmayhteys vauriosta sisäilmaan. Tiiveystaso 1[14].	KVKS	Päätetään mallihuoneen koekorjauksesta sekä tiivistyskorjauksen laadunvarmistuksesta[14].	KVKS, KVKT, RTA*	Tiiveystason seuranta erillisen suunnitelman mukaisesti.	KVKS, KVKT, RTA
Vaurioitumattomien rakennusosien tiiveyttä parannetaan tiiveystasolle 2 [14].	KVKS	Materiaalien soveltavuuden arviointi käyttöikäntavoitteeseen verrattuna. Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.	KVKS, KVKT, RTA*	Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS
Laaaja-alaisten, koko rakennusosaa koskevat rakenteen sisäpinnalla olevat vauriot poistetaan (esim. laaja-alainen muovimattovaurio).	KVKS	Korjausalueen laajuuden määrittäminen.	KVKT, KVKS, RTA*	Korjaustavan perusteella määritellään erillinen suunnitelma seurannalle.	KVKS, KVKT, RTA
Teolliset mineraalikululähteet poistetaan.	KVKS	Korjausratkaisun tarkastaminen, tavoiteltava käyttöikä vastaa muiden rakennusosien käyttöikää.	KVKT, RTA*	Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS
Rakennusosien paikalliset vauriot poistetaan tai ilmayhteys vauriosta sisäilmaan estetään, tiiveystaso 1[14].		Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.	KVKS	Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS, KVKT, RTA
Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainotus ja ilmamäärien säätäminen tilojen käyttötarkoituksen mukaiseksi.		Korjausalueen laajuuden määrittäminen.	KVKT, KVKS	Tiiveystason seuranta erillisen suunnitelman mukaisesti.	KVKS, KVKT, RTA
IV-järjestelmän käyttöikä vastaa rakenteille tavoiteltavaa käyttöikää. Sisäilmauikutuksen mukainen tavoitetaso.	IV	Korjausratkaisun tarkastaminen, tavoiteltava käyttöikä vastaa muiden rakennusosien käyttöikää.	KVKS, RTA*	Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS
	IV	Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.	KVKS	Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS
	IV	Ilmamäärien mittaus.	IV, SISA, RTA	Paine-eron seuranta, paine-eron valvontajärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*
	IV	Tilamuutokset ja -järjestelyt.	IV		
	IV	Sisäilmaston laatuolosuhteiden todentaminen.	IV, SISA, RTA		

Taulukko 4. Korjausratkaisujen periaatteet, joilla rakennuksen käyttöikää jatketaan 1 – 5 vuotta. Tavoiteltu altistumisolosuhdeluokka on 2.

Suunniteltu korjausratkaisu	Vastaava asiantuntija	Suunnitteluvaiheen laadunvarmistus	Vastaava asiantuntija	Tilojen käytön aikainen seuranta	Vastaava asiantuntija
Laaja-alainen, koko rakennusosaa koskevien haittojen vaikutusta sisäilmaan vähennetään, pienentämällä vuotoilmavirtauksia vauriosta sisälmaan. Tiiveystaso 3 [14].	KVKS	Päätetään mallihuoneen koekorjauksesta sekä tiivistyskorjauksen laadunvarmistuksesta [14]. Käytettävien materiaalien soveltavuuden arviointi käyttöikäntavoitteeseen verrattuna.	KVKS, KVKT RTA*	Tiiveystason seuranta erillisen suunnitelman mukaisesti. Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	RTA*, KVKT
Laaja-alaiset, koko rakennusosaa koskevat rakenteen sisäpinnalla olevat vauriot poistetaan (esim. laaja-alainen muovimattovaurio). Laaja-alaiset teolliset mineraalikulutähteet poistetaan.	KVKS KVKS	Korjauslaajuuden määrittäminen. Suunnitelmien tarkastus, tavoiteltava käyttöikä vastaa muiden rakennusosien käyttöikää. Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.	KVKS, KVKT KVKT, RTA*	Korjaustavan perusteella määritellään erillinen suunnitelma seurannalle. Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS KVKS
Rakennusosien paikalliset vauriot korjataan pienentämällä vuotoilmavirtauksia haitasta sisälmaan. Tiiveystaso 3 [14].	KVKS	Paikallisen vaurion vaikutuksen arviointi tilan altistumisolosuhdealuokkaan. Tiivistyskorjauksen laadunvarmistus [14].	RTA* RTA*, KVKT	Korjaustavan perusteella määritellään erillinen suunnitelma seurannalle. Suunnitelma liitetään kiinteistön huoltokirjaan.	KVKS KVKS
Ilmamäärien säätäminen tilojen käyttötarkoituksen perusteella. Paine-erojen hallinta Rakennuksen paine-erojen tasapainotus tai lievä ylipaineistus.	IV IV	Ilmamäärien mittaus. Tilamuutokset- ja järjestelyt. Paine-eroseuranta.	RTA IV RTA	Paine-eron seuranta, paine-eron valvonta- ja hälytysjärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*

Taulukko 5. Korjausratkaisujen periaatteet, joilla rakennuksen käyttöikää jatketaan alle yksi vuosi. Tavoiteltu altistumisolosuhteluokka on 2 tai 3.

Suunniteltu korjausratkaisu	Vastaaja asiantuntija	Suunnitteluvaiheen laadunvarmistus	Vastaava asiantuntija	Tilojen käytön aikainen seuranta	Vastaava asiantuntija
Rakennusosien, kerrosten tai rakennuksen osien yli- tai alipaineistaminen. Tavoitteena vuotoilmavirtausten pienentäminen vaurioituneista rakenteista sisäilmaan.	KVKS, IV	rakennusosan alipaineistuskokeet.	KVKT, RTA*	Paine-eron seuranta, paine-eron valvonta- ja hälytysjärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*
Rakennusosien riittävän tiiveyden varmistaminen, jotta saavutetaan suunniteltu paine-erojen hallinta.	KVKS	Vuotoilmareittien paikantaminen. Vuotoilmareittien merkittävyyden arviointi.	KVKT, RTA* KVKT, RTA* KVKS	Paine-eron seuranta, paine-eron valvonta- ja hälytysjärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*
Laaja-alaiset teolliset mineraalikulutiahteet poistetaan.		Pölyn- ja kosteudenhallintaselvitys.			
Vaihtoehtoisesti yksittäisten tilojen tai kerrosten käyttötarkoituksen muutokset tai käytöstä poistaminen, jos rakenteiden sisäpinnoilla tai rakenteissa on todettu laaja-alaisia vaurioita (helposti rajattavia rakennuksen osia, esim. kellari).	KVKS	Tilan tai kerroksen alipaineistuskoe, merkittävien vuotoilmareittien paikantaminen.	KVKT, RTA*	Paine-eron seuranta, paine-eron valvonta- ja hälytysjärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*
Ilmamäärien säätäminen tilojen käyttötarkoituksen perusteella. Paine-erojen hallintajärjestelmä eri tilojen sekä ulko- ja sisäilman välillä.	KVKS, IV	Ilmamäärien mittaus ja riittävyys käyttötarkoitukseen.	IV, KVKT, RTA, SISA	Paine-eron seuranta, paine-eron valvonta- ja hälytysjärjestelmä.	IV, KVKT, RTA*

3.5 Rakennuksen tai tilan käytöstä luopuminen

Taulukoissa 2–5 on esitetty korjausratkaisuja rakennuksen eri käyttöikätaivoitteisiin. Jos korjausratkaisuilla ei pystytä saavuttamaan rakennukseen terveellisiä olosuhteita tai korjauskustannukset ovat käyttöikätaivoitteisiin nähden liian korkeat, rakennuksen tai tilan käytöstä luovutaan. Tämä tarkoittaa, että rakennusosissa ja/tai rakenteissa tai niiden sisäpinnoilla on laaja-alaisia korjauksia vaativia vaurioita. Rakennusosien tiivistyskorjaus ei ole aina mahdollista, koska riittävää tiiveystasoa ei voida saavuttaa rakenneratkaisuista ja vaurioiden laajuudesta johtuen.

3.6 Arviointimallin soveltaminen peruskorjauskohteeseen

Esimerkkikohteena käytettiin taulukossa 1 esitettyä kohdetta numero 7, joka on peruskorjauskohde (käyttöikätaivoite yli 25 vuotta). Kohteen altistumisolosuhdeluokka ennen peruskorjausta oli 4. Korjausten jälkeen altistumisolosuhdeluokan tavoitteeksi on asetettu 1. Käytettävät korjausratkaisujen periaatteet, laadunvarmistusmenetelmät sekä seuranta valitaan taulukosta 2. Arviointimenetelmän soveltaminen on esitetty taulukossa 6 rakennusosakohtaisesti.

Taulukko 6. Arviointimenetelmän soveltaminen peruskorjauskohteeseen. Korjausratkaisujen pääperiaatteet on esitetty rakennusosakohtaisesti.

Kuntotutkimusvaihe				Korjaussuunnittelu			
RO	Haitta	Haitan laajuus	Ilma-vuoto	RO uusitaan	RO tiivistetään	Laadunvarmistus	Seuranta
SO	kosteus/mikrobi	laaja	laaja	ei	tiiveystaso 1	Tiiveystason varmistaminen RO:ssa	takuutarkastus, 3 vuoden välein
AP	kosteus/mikrobi	laaja	laaja	Kyllä	SO:n liitoksen tiivistäminen, taso 1	Tiiveystason varmistaminen RO:ssa	takuutarkastus
MVS	kosteus/mikrobi	laaja	laaja	kyllä	AP:n liitoksen tiivistäminen, taso 1	Tiiveystason varmistaminen RO:ssa	takuutarkastus
US	mikrobi	laaja	laaja	kyllä	Ikkunaliitos, tiivistäminen	Tiiveystason varmistaminen RO:ssa	takuutarkastuksen jälkeen 3 vuoden välein
VP	mikrobi	laaja	laaja	kyllä	ei	urakkavaihe	huolto-ohjelma
YP	mikrobi	laaja	laaja	kyllä	ei	urakkavaihe	huolto-ohjelma
VK	kosteus	paikallinen	-	kyllä	ei	urakkavaihe	huolto-ohjelma
IV	merkittävä	laaja	-	kyllä	ei	urakkavaihe	huolto-ohjelma

RO = rakennusosa, SO = sokkeli, AP = alapohja, MVS= maanvastainen seinä, US = ulkoseinä, VP = välipohja, YP = yläpohja, VK = vesikatto, IV = ilmanvaihtojärjestelmä

4. Yhteenveto

Arviointimenetelmässä korjaussuunnitteluratkaisut valitaan rakennuksen käyttöiän ja tavoitellun altistumisolosuhdetason perusteella. Korjaussuunnitelmien perusteella tehdään kohdekohtainen selvitys korjausten vaikutuksesta altistumisolosuhteisiin, jossa arvioidaan haitan poistumista ja valittuihin korjausmenetelmiin liittyvien riskien merkitystä sisäilman laatuun. Suunnittelu-, laadunvarmistus- ja seurantavaiheissa on oltava pätevyysvaatimukset tai -suositukset täyttävä vastaava asiantuntija. Korjauksilla tavoiteltava altistumisolosuhdetaso sekä siihen liittyvät korjausten laadunvarmistus ja -seurantamenetelmät tulee hyväksyttävä sisäilmaryhmällä sekä tarvittaessa kohteen terveyden- tai työsuojeluviranomaisilla. Korjauksien jälkeen tavoiteltu

altistumisolosuhdetaso ja rakennuksen käyttöikä tulee uudelleen arvioida, mikäli rakennuksen käyttötarkoitusta muutetaan.

Kiitokset

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston myöntämällä tutkimus- ja kehittämisrahoituksella. Kiitämme ohjausryhmän jäseniä Anne Hyvärinen THL, Timo Turunen, Ramboll Oy, Marko Vartiainen ja Marko Pasanen Savon koulutus kuntayhtymä. Lisäksi kiitämme Savon koulutus kuntayhtymää yhteistyöstä hankkeen aikana.

Lähdeluettelo

- [1] Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132 ja muutokset 2007, 2012 ja 2013.
- [2] Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta 41/2014
- [3] Terveysturvallisuuslaki 763/1994.
- [4] Terveysturvallisuuslain muutos 1237/2014
- [5] Työturvallisuuslaki 738/2002.
- [6] Ympäristöministeriön asetus rakentamista koskevista suunnitelmista ja selvityksistä 216 / 2015
- [7] Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016, Ympäristöministeriö, 2016.
- [8] Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen. Työterveyslaitos. 2016. <http://www.julkari.fi/handle/10024/129932>
- [9] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015
- [10] Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta 25.6.2015/7987 §
- [11] Kosteus- ja homevauriot – Ratkaisuja työpaikoille. Salonen H., Lahtinen M., Lappalainen S., Tähtinen K., Holopainen R., Pietarinen V-M., Palomäki E., Karvala K., Tuomi T., Reijula K. 2, uudistettu painos. Työterveyslaitos, Helsinki 2015
- [12] Selätä sisäilmastokiista – viesti viisaasti. Lahtinen M. Ginström A., Harinen S., Lappalainen S., Tarkka O., Unhola T. Työterveyslaitos, Helsinki 2010.
- [13] Työterveyshuoltolaki 1383/2001.
- [14] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen kosteusteknisestä toimivuudesta, luonnos 21.12.2016
- [15] Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012, Suomen rakentamismääräyskokoelma D3, Ympäristöministeriö
- [16] Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein. RT 14-11197, LVI 01410565, KH 90-00577. Rakennustietosäätiö, 2016.

Käyttöä turvaavat toimenpiteet kosteus- ja homevaurioituneissa rakennuksissa

Kaisa Jalkanen¹, Hanna Leppänen¹, Mari Turunen¹ ja Ulla Haverinen-Shaughnessy¹, Tero Marttila² ja Anne Hyvärinen¹

¹ Terveystieteiden tutkimuskeskus (THL)

² Tampereen teknillinen yliopisto (TTY)

Tiivistelmä

Esityksessä kuvataan Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER) hankkeessa koottu tieto ilmanpuhdistimien ja biosidien käytöstä, ns. tiivistämiskorjausten toimivuudesta ja rajoituksista, siivouksesta ja irtaimiston puhdistamisesta sekä prosessin johtopäätöksiä. Tietoa koottiin mm. kirjallisuuskatsausten, erilaisten kyselyiden ja verkostotapaamisten avulla sekä muiden tutkimushankkeiden tuloksia hyödyntämällä.

1. Johdanto

Rakennusten sisäilmaongelmien syiden korjaaminen ei ole aina mahdollista resurssien puuttuessa ja aina ongelmat eivät ole sellaisia, että ne vaativat välitöntä korjaamista. Tällöin tulee harkita rakennuksen käyttöä turvaavia toimenpiteitä eli keinoja torjua ja vähentää rakennuksen käyttäjien altistumista rakennusperäisille terveydellisille riskeille. Altistumista on pyritty torjumaan tai vähentämään esimerkiksi ilmanpuhdistimilla tai tekemällä erilaisia pintojen ja rakenteiden kemiallisia käsittelyjä, mutta näiden toimenpiteiden tehosta sekä mahdollisista haitoista ja rajoituksista tarvitaan lisää tietoa. Olennainen osa terveystieteiden tutkimuksen korjausten jälkeinen siivous, jonka merkityksestä tarvitaan lisää tietoa sekä valistusta. AVATER-hankkeen tavoitteena oli koota tietoa, voidaanko ns. käyttöä turvaavilla toimenpiteillä, kuten ilmanpuhdistimien ja biosidien käytöllä, tiivistyskorjauksilla sekä korjausten jälkeisellä siivouksella ja irtaimiston puhdistamisella torjua tai vähentää tilojen käyttäjien altistumista home- ja kosteusvaurioituneissa rakennuksissa tai ns. homekorjausten jälkeen.

2. Ilmanpuhdistimien käyttö

Hankkeessa selvitettiin, miten rakennukseen sijoitettavat erilliset ilmanpuhdistimet vaikuttavat sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksiin ja koettuihin terveyshaittoihin keskittyen erityisesti kosteus- ja homevaurioista johtuviin sisäilmaongelmiin. Työ toteutettiin tekemällä kirjallisuuskatsaus tehdyistä tutkimuksista, kyselyllä kunnilta ilmanpuhdistimien käytön yleisyydestä ja toimivuudesta koettujen haittojen vähentämiseen koulukohteissa, kokoamalla käyttäjäkokemuksia suurimmilta kunnilta, joissa ilmanpuhdistimia on käytetty, kokoamalla tietoa eniten käytettyjen laitteistojen teknisestä suoriutumisesta sekä verkostotapaamisella, jossa oli mukana muun muassa alan toimijoiden ja yhdistysten edustajia. Lisäksi hankkeessa on hyödynnetty THL:n kenttätutkimushanketta ilmanpuhdistimien tehosta kosteusvauriokohteissa (PUHKO).

2.1 Johtopäätöksiä ilmanpuhdistimien käytöstä

Ilmanpuhdistimilla voidaan vähentää sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksia [1]. Tämänhetkiset

kokeelliset tutkimukset ovat kuitenkin puutteellisia osoittamaan ilmanpuhdistimien hyötyjä allergioita ja astmaa sairastaville henkilöille. Osassa ilmanpuhdistimien käyttämisestä tekniikoista voi syntyä sivutuotteina haitallisia yhdisteitä, mutta ns. yhdistelmälaiteella saavutettu hyöty voi olla suurempi kuin sen sivutuotteesta aiheutuva haitta.

Ilmanpuhdistimia ei tule käyttää korjausten välttämiseksi tai korvaamaan puutteellista siivousta tai ilmanvaihtoa. Ilmanpuhdistimia voi käyttää pääasiassa väliaikaisesti esim. remonttia odottaessa tai sen aikana suojaamaan viereisiä tiloja, auttamaan herkistynyttä esim. palaamaan korjattuun tilaan ja tiloissa, joissa tavallista suurempi hajukuorma. Ilmanpuhdistimien tarve on kuitenkin aina arvioitava tapauskohtaisesti ja ennen ilmanpuhdistimien käyttöönottoa tulee arvioida myös muiden epäpuhtauspitoisuuksia alentavien toimenpiteiden toteuttamista. Myös käyttäjille tulisi järjestää koulutusta, joissa kerrotaan laitteen toimintaperiaate, sijoittaminen, käyttö ja huolto.

Ilmanpuhdistimissa käytetään useita tekniikoita epäpuhtauksien poistamiseksi ja laitteiden tekninen vertailu on hankalaa. Eri laitteiden vertailua helpottaisi yhteinen kriteeristö. Lisäksi tarvitaan lisää tutkimusta ilmanpuhdistimien tehokkuudesta vähentää erilaisia sisäilman epäpuhtauksia ja niistä aiheutuvia terveyshaittoja. Tutkimuksessa ja myös käytännössä on tärkeää huomioida tietyistä ilmanpuhdistusmenetelmissä mahdollisesti syntyvät terveydelle haitalliset yhdisteet.

3. Biosidien käyttö

Hankkeessa referoitiin Työterveyslaitoksen Biosidit ja korjausrakentaminen -raportti [2] sekä Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen Otsonointi sisäympäristöissä - kirjallisuuskatsaus verkkojulkaisu [3], joiden pohjalta tuotettiin keväällä 2016 Työterveyslaitoksen ja Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen yhteinen kannanotto ja suositukset biosidien käytöstä korjausrakentamisessa. Lisäksi hankkeessa käytettiin verkostotyöpajan antia aiheeseen liittyen.

3.1 Johtopäätöksiä biosidien käytöstä

Biosideilla tarkoitetaan kemiallisia aineita, valmisteita tai pieneliöitä, joiden tarkoituksena on tuhota, torjua tai tehdä haitattomaksi haitallisia eliöitä, estää niiden vaikutusta tai rajoittaa niiden esiintymistä. Myös otsoni luokitellaan biosidiksi. Biosideina käytettävät tuotteet ovat kemialliselta koostumukseltaan, teholtaan ja käyttötavoiltaan erilaisia. Desinfioivia biosidivalmisteita on käytetty korjausrakentamisessa homesiivousten yhteydessä tai homeiden ehkäisyssä.

Biosidivalmisteiden teho mikrobeihin on epävarmaa. Sisäilman ja rakennusten mikrobisto on hyvin laaja, jolloin on vaikea osoittaa, että jokin tietty biosidi tehoaisi kaikkiin materiaaleissa tai sisäilmassa oleviin mikrobeihin. Tutkimustieto on tältä saralta hyvin suppeaa ja usean käytössä olevan biosidin teho voidaankin jopa kyseenalaistaa. Koska biosidien tarkoitus on poistaa tai vähentää ympäristöstä mikrobeja, ovat ne luonnostaan biologisesti aktiivisia aineita. Monet biosidiset yhdisteet ovat ihoa ja limakalvoja ärsyttäviä, jotkin haitallisia hengitettynä, ihon kautta ja nieltynä, ainakin suurina määrinä ja jatkuvassa altistuksessa. Joillakin aineilla voi olla vakavampia haittavaikutuksia kuten lisääntymisvaikeudet, syöpävaarallisuus ja herkistävyys. Biosidien terveysvaikutukset riippuvat pitkälti kemikaalien pitoisuuksista käytetyissä tuotteissa. Altistumiseen vaikuttaa käytetyn aineen lisäksi aineen säilyminen ilmassa ja pinnoilla.

Työterveyslaitoksen ja Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen yhteisen kannanoton mukaan biosidien käyttöä ei suositella ratkaisuksi homeongelmiin, homesiivouksen tehosteeksi tai homekasvun ehkäisyyn kuin poikkeustapauksissa, kuten viemäri vahinkojen yhteydessä. Eri biosidiyhdistysten vaikutuksesta mikrobeihin ei tiedetä tarpeeksi.

Tällä hetkellä ei ole tiedossa, kuinka hyvin Työterveyslaitoksen ja Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen yhteinen kannanotto biosidien käytöstä tunnetaan alalla toimivien yritysten keskuudessa tai noudattavatko esimerkiksi vakuutusyhtiöt kannanoton suosituksia. Kannanoton jalkautuminen kentälle tulisikin varmistaa esimerkiksi koulutuksen avulla. Myös biosidikäsittelyä tekevien yritysten koulutustaso vaihtelee ja heille tulisikin järjestää yhdenmukaista, puolueetonta koulutusta ja koulutusmateriaalia myös biosidien ominaisuuksista ja niiden turvallisesta käytöstä. Lisäksi kannanottoa ja suositusta tulisi mahdollisuuksien mukaan täsmentää varoaikojen osalta biosidikohtaisesti ja määrittellä varoaika tarkemmin tuuletuksen ja siivouksen osalta. Tarvitaan lisää tutkimusta biosidien ja otsonoinnin hyödyistä ja tehosta korjausrakentamisen yhteydessä ja käsittelyjen vaikutuksesta rakennuksen mikrobiomiin ja terveyteen.

4. Tiivistyskorjaukset

Tiivistyskorjauksella tarkoitetaan tässä yhteydessä peruskorjaustason menetelmää, jolla rakenteiden liitoskohtien hallitsemattomia ilmapirtauksia ja virtausten mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien pääsyä huoneilmaan estetään vedeneristämistä vastaavilla menetelmillä ja vedeneristeiden kaltaisilla tuotteilla. Tietoa tiivistyskorjauksista kerättiin käymällä läpi tiivistyskorjauksiin liittyvää kirjallisuutta ja keräämällä kokemuksia alan yrityksiltä, kunnilta ja asiantuntijoilta. Internetkyselyllä selvitettiin mm. tiivistyskorjauksiin liittyviä käyttöikätoivoitteita. Niitä selvitettiin sekä korjauksia tekevien yritysten, että niitä tilaavien kuntien näkökulmista.

4.1 Johtopäätöksiä tiivistyskorjausten käytöstä

Tiivistyskorjauksia ei pidä käyttää selkeiden kosteusvaurioiden pintapuolisena korjausmenetelmänä, koska riski tiivistyksen tartunnan pettämisestä on merkittävä. Korjaustavasta riippumatta vaurion aiheuttaja tulee aina selvittää ja poistaa. Tiivistys ei myöskään sovellu kaikille rakenteille ja rakenteita ei tulisi milloinkaan tiivistää ilman tutkimuksia, suunnittelua, korjauksen valvontaa ja seuranta. Tiivistetyt rakenteet tulisi tutkia merkkiainekokeilla ohjekortin RT 14-11197 mukaisesti. Pitkäaikaiskestävyydestä todellisissa kohteissa ei ole luotettavaa tutkimustietoa ja tiivistettyjen rakenteiden seurantamittauksia suositellaan senkin takia, että käyttäjät voivat toiminnallaan aiheuttaa reikiä tiivistettyihin rakenteisiin.

Tiivistyskorjauksilla voidaan vaikuttaa siihen, että esimerkiksi maaperästä tai ulkopuolisista rakenteissa peräisin olevat mikrobipäästöt pysyisivät sellaisella tasolla, että ne eivät aiheuta ongelmia suurimmalle osalle rakennuksen käyttäjistä. Erityisen tärkeää rakenneliitosten tiivistäminen on voimakkaasti alipaineisissa rakennuksissa tai sen osissa. Rakenteiden tiivistäminen muuttaa rakennuksen painesuhteita, joten ilmanvaihtojärjestelmä tulee aina säätää uudelleen korjauksen jälkeen.

Hankkeessa toteutettu kyselytutkimus osoitti, että tiivistyskorjaukset ovat yleistyneet. Kyselyn ja verkostotapaamisten perusteella tiivistyskorjauksiin osataan suhtautua pääasiassa asiallisesti ja uuden menetelmän edellyttämällä varovaisuudella. Kirjallisuuskatsauksessa ei ilmennyt teknisiä esteitä tiivistyskorjausten toteuttamiselle. Oikein toteutettuna rakenteiden sisäpintojen

tiivistäminen on keskeinen osa onnistunutta lopputulosta niin korjaamisessa kuin uudisrakentamisessakin. Kirjallisuuslähteissä ja julkisessa keskustelussa on kuitenkin raportoitu useita epäonnistumisia. Jatkossa olisi ensiarvoisen tärkeää löytää keinot, joilla tiivistyskorjaukset saadaan onnistumaan myös käytännössä. Merkkiainekokeiden suorittamista ohjeistavan syksyllä 2015 julkaistun RT 14-11197 ohjekortin tai tiivistyskorjauksia tekeville järjestettävien sertifiointikoulutusten mahdollisia positiivisia vaikutuksia tiivistyskorjausten laatuun ei vielä tiedetä. Tutkimustarpeita tiivistyskorjauksiin liittyen on paljon esimerkiksi seuraavilla osa-alueilla: korjausten onnistuminen sekä käyttöikä, vaikutukset sisäilman laatuun, käyttäjien kokemukset ja mielikuvat tiivistyskorjauksiin liittyen sekä korjaustavan valinnan merkitys rakennuksen jälleenmyyntiarvoon. Lisäksi olisi selvittävää, mitkä rakenneratkaisut jopa edellyttävät tiivistystä tai toisaalta millaisten rakenneratkaisujen tiivistäminen ei onnistu.

5. Siivous ja irtaimiston puhdistus

Tavoitteena oli selvittää, noudatetaanko annettuja ohjeita rakennuksen siivoamiselle ja irtaimiston puhdistamiselle kosteus- ja homevauriokohteiden korjausten jälkeen sekä miten tehdyt toimenpiteet tai niiden tekemättä jättäminen ovat vaikuttaneet erityisesti koettuihin oireisiin, mutta myös altistumistasoihin. Työ tehtiin kokoamalla tietoa olemassa olevasta ohjeistuksesta ja tehdyistä tutkimuksista, analysoimalla THL:n HOTES hankkeen tutkimusaineiston tuloksia tässä valossa, keräämällä kokemuksia verkostotapaamisissa sekä kyselyllä kunnille ohjeiden käytöstä ja käyttäjäkokemuksista koulukohteiden korjausten jälkeen.

Suomessa on julkaistu viime vuosina useita ohjeita koskien korjausten jälkeistä siivousta: ”Homevaurioituneen rakenneosan puhdistusohje” [4], ”Ohje siivoukseen ja irtaimiston puhdistukseen kosteus- ja homevauriokorjausten jälkeen” [5] sekä ”Homevaurioituneen rakennusmateriaalin puhdistusohje rakenneosille, joita ei voi poistaa” [6].

5.1 Johtopäätöksiä siivouksesta ja irtaimiston puhdistuksesta

Homevaurioituneissa rakennuksissa sisäilmaan kulkeutuu mikrobeja ja niiden aineenvaihduntatuotteita, joista osa koetaan hajuina. Rakenteiden purkamisen ja korjaamisen aikana mikrobien määrä sisäilmassa kasvaa merkittävästi. Vapautuva mikrobipöly ja homehaju tarttuvat kaikille mahdollisille pinnoille ja kaasumaiset yhdisteet imeytyvät huokosiin materiaaleihin, mistä voi aiheutua tilojen käyttäjille terveyshaittoja. Korjausten jälkeen tehtävän siivouksen ja irtaimiston puhdistuksen tavoitteena on pienentää terveyshaittojen esiintymisen todennäköisyyttä korjatuissa tiloissa.

Kuntiin tehdyn kyselyn mukaan oireilu vähenee pääsääntöisesti korjausten jälkeen: 60 % kunnista raportoi, että 1–25 % kohteissa koetaan oireita korjausten jälkeen. Hyvin ja oikein toteutettu siivous edesauttaa sitä, että tilojen käyttäjät voivat palata korjattuihin tiloihin.

Työterveyslaitoksen siivousohjeistus [5] on melko yleisesti käytössä erityisesti julkisissa kiinteistöissä ja sen koetaan toimivan pääsääntöisesti hyvin. Ohjeistusta pidetään kuitenkin melko laajana ja olemassa olevan ohjeistuksen lisäksi tarvittaisiin lisää ohjeistusta kosteus- ja homevaurioiden siivoukseen liittyen erityisesti asuntokohteisiin sekä isännöitsijöille ja taloyhtiöille, lievemmille kosteus- ja homevauriotapauksille ja muille sisäilmaongelmille sekä täsmennystä irtaimiston uusimisen periaatteisiin. Lisäksi tulisi varmistaa, että myös yksityishenkilöille olisi tarjolla asianmukaista ja laadukasta siivouspalvelua. Tutkimustietoa tarvitaan siivouksen ja siivouskemikaalien vaikutuksesta altistumiseen ja ihmisten oireiluun.

6. Yhteenveto

Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER) hankkeessa koottu tieto rakennusten käyttöä turvaavien toimenpiteiden käytöstä paljasti useiden selkeiden tutkimustarpeiden lisäksi myös sen, että käytännön toimia tarvitaan edelleen tämänhetkisen parhaan tiedon jalkauttamiseksi kentälle. Tarvitaan koulutusta ja voimassa olevia ohjeistuksia tulisi täsmentää tai laajentaa.

Ilmanpuhdistimia tulee käyttää pääasiassa väliaikaisesti, eikä ikinä korjausten välttämiseksi tai korvaamaan puutteellista siivousta tai ilmanvaihtoa. Tutkimusten mukaan ilmanpuhdistimilla voidaan vähentää sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksia, mutta lisää tietoa tarvitaan niiden tehokkuudesta ja käytön vaikutuksista terveyshaittoihin. Laitteiden tekninen vertailu on myös hankalaa – tätä helpottaisi yhteinen kriteeristö.

Työterveyslaitoksen ja Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen yhteisen kannanoton mukaan biosidien käyttöä ei suositella ratkaisuksi homeongelmiin, homesiivouksen tehosteeksi tai homekasvun ehkäisyyn kuin poikkeustapauksissa, kuten viemäri vahinkojen yhteydessä. Kannanoton jalkautuminen kentälle tulisi varmistaa ja yhdenmukaista, puolueetonta koulutusta ja koulutusmateriaalia tulisi olla tarjolla biosidien ominaisuuksista ja niiden turvallisesta käytöstä. Tutkimusta biosidien ja otsonoinnin hyödyistä ja tehosta korjausrakentamisen yhteydessä ja käsittelyjen vaikutuksesta rakennuksen mikrobiomiin ja terveyteen tarvitaan myös lisää.

Tiivistyskorjauksella ei tule piilotella riskejä eikä etenkään vaurioita. Tiivistys ei sovellu kaikille rakenteille ja tiivistyskorjaukseen päättymisen tulee olla aina menetelmään ja kohteeseen liittyvät riskit tiedostava valinta. Oikein toteutettuna rakenteiden sisäpintojen tiivistäminen on keskeinen osa onnistunutta lopputulosta niin korjaamisessa kuin uudisrakentamisessakin.

Tiivistyskorjausten yleistyessä tarvitaan luotettavaa tutkimustietoa niiden pitkäaikaiskestävyydestä sekä keinoista niiden onnistumisen varmistamiseksi käytännössä.

Korjausten jälkeen tehtävän siivouksen ja irtaimiston puhdistuksen tavoitteena on pienentää terveyshaittojen esiintymisen todennäköisyyttä korjatuissa tiloissa. Hyvin ja oikein toteutettu siivous edesauttaa sitä, että tilojen käyttäjät voivat palata korjattuihin tiloihin. Työterveyslaitoksen ohjeistus siivoukseen ja irtaimiston puhdistukseen on melko yleisesti käytössä erityisesti julkisissa kiinteistöissä ja sitä pidetään pääsääntöisesti toimivana. Lisää ohjeistusta kaivataan kuitenkin erityisesti asuntokohteisiin, isännöitsijöille ja taloyhtiöihin. Myös lievemmillä kosteus- ja homevauriotapauksille ja muille sisäilmaongelmille kaivataan omaa ohjeistusta sekä täsmennystä irtaimiston uusimisen periaatteisiin.

Lähdeluettelo

- [1] Institute of Medicine (IOM) 2000. Clearing the Air: Asthma and Indoor Air Exposures. Committee on the Assessment of Asthma and Indoor Air, Division of Health Promotion and Disease Prevention.
- [2] Louhelainen K, Santonen T, Moisa J, Stockmann-Juvala H, Pennanen S, Lapinlampi T. 2016. Biosidit ja korjausrakentaminen. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-261-632-6>
- [3] Leppänen H, Peltonen M, Komulainen H, Hyvärinen A. 2017. Otsonointi sisäympäristöissä – kirjallisuuskatsaus. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-302-837-1>

- [4] Hometalkoot 2016. Homevaurioituneen rakenneosan puhdistusohje. Saatavilla: <http://www.hometalkoot.fi/file/15921.pdf>
- [5] Työterveyslaitos 2016. Ohje siivoukseen ja irtaimiston puhdistukseen kosteus- ja homevauriokorjausten jälkeen. Saatavilla: <http://www.hometalkoot.fi/file/15862.pdf>
- [6] Hometalkoot 2013. Homevaurioituneen rakennusmateriaalin puhdistusohje rakenneosille, joita ei voi poistaa. Saatavilla: <http://www.hometalkoot.fi/file/15838.pdf>

Kohti sisäilmasairaille soveltuvaa rakentamista – kehitystyön lähtökohtia

Katja Pulkkinen
Homepakolaiset ry

Tiivistelmä

Sisäilmasairaille soveltuvalla rakentamisella on kasvava tarve. Toistaiseksi puuttuu kuitenkin yhteinen määritelmä siitä, mitä tällaisella rakentamisella tarkoitetaan. Ei ole myöskään selvyyttä siitä, millaiset ratkaisut ja materiaalit tarkoitukseen soveltuvat. Moni kokeilu epäonnistuu.

Kokeilujen keskittämiseksi toimiviin ratkaisuihin tarvitaan linjaukset sisäilmasairaille soveltuvan rakentamisen reunaehdoiksi. Sisäilmasairaille suunnatussa rakentamisessa tarvitaan eritasoisia reunaehtoja riippuen sisäilmasairaudesta vakavuusasteista. Tilanteen selkiyttämiseksi Homepakolaiset-yhdistyksessä on kehitetty kolmiasteinen luokitus sisäilmasairaudesta vakavuusasteista ja alustava ehdotus ko. reunaehdoiksi.

Jotta sisäilmasairaille suunnattua rakentamista voidaan kehittää, on tärkeää kerätä vertailukelpoista seurantatietoa kokeilukohteista.

1. Johdanto

Sisäilmakodittomuus on nopeasti yleistynyt ilmiö. Lisäksi monilla työpaikoilla ja oppilaitoksissa kamppaillaan sisäilmasairaille soveltuvien tilojen etsimisen kanssa – usein tuloksetta. Sisäilmasairaille soveltuvalla rakentamisella on kasvava tilaus, mutta tietoa siitä, millaisin rakennusteknisin toimin ratkaisuja voidaan tuottaa, ei ole olemassa. Lähtökohdiltaan hyvin monenlaisia kohteita tarjotaan sisäilmasairaille sopiviksi, ja valitettavan moni kohde epäonnistuu tavoitteissaan.

Tässä esitelmässä kuvataan sisäilmasairaita rakentamisen kohderyhmänä ja eritellään, minkä tyyppisiä seikkoja tulee huomioida sisäilmasairaille suunnatussa rakentamisessa. Toimet ja tarpeet on jaoteltu sisäilmasairaudesta kolmen vakavuusasteen mukaan.

Aihepiiriä jäsenetään sisäilmasairaiden potilasjärjestöön, Homepakolaiset-yhdistykseen, vuosien aikana kertyneeseen kokemuspohjaisen tietoon pohjautuen ja esitetään tältä pohjalta ehdotuksia kehitystyön sekä jatkokeskustelun pohjaksi.

2. Kolme kohderyhmää

Sisäilmasairaiden joukkoon mahtuu hyvin erityyppisiä tilanteita ja oirekuvia. Esimerkiksi herkistyminen ympäristötekijöille vaihtelee voimakkaasti riippuen sairastumisen vakavuusasteesta, mikä vaikuttaa ratkaisevasti esimerkiksi rakennusmateriaalien valintaan ja rakennuksen sijainnin suunnitteluun.

Homepakolaiset ry:n Ratkaisuja sisäilmasairaille -projektissa on kehitetty kolmiasteinen luokitus kuvaamaan sisäilmasairauden vakavuusluokkia [1,2]. Nämä kolme ryhmää kuvataan alla. Samassa esitetään myös, millaisia ovat kunkin ryhmän tarpeet juuri rakentamista ajatellen.

2.1 Ensimmäisen asteen sisäilmasairas – yleinen terveellinen rakentaminen

Ensimmäisen asteen sisäilmasairas oireilee tiloissa, joissa on merkittäviä sisäilman laatuun vaikuttavia ongelmia. Oireilu ei kuitenkaan ole kroonistunut eikä henkilö ole herkistynyt ympäristötekijöille. Jos altistuminen katkaistaan tässä vaiheessa, terveydentila palautuu normaaliksi, eikä pysyvää sairastumista ole ehtinyt tapahtua.

Ensimmäisen asteen sisäilmasairaalla monenlaiset infektiokierteet, kuten silmä- ja poskiontelontulehdukset, ovat lisääntyneet. Yksittäisistä oireista esim. väsymys, päänsärky, yskä, raajojen puutumisesta ovat tyypillisiä.

Ensimmäisen asteen sisäilmasairas on normaalin työkykyinen, mutta oireilun vuoksi hänelle on usein alkanut kertyä sairauspoissaoloja ja työteho on laskenut. Työteho palautuu ja oireet poistuvat terveellisissä olosuhteissa.

Sairastumisen ehkäisemiseksi tarvitaan terveellinen työ-/opiskelu-/asuintila. Terveellinen tila tässä yhteydessä tarkoittaa väestötason mittapuun mukaisesti terveellistä: ei merkittäviä home- ja kosteusvaurioita eikä merkittäviä terveyshaittaa aiheuttavia aineita rakentamisessa (esim. märkäbetoni-muovimatto -yhdistelmä tai muut materiaalit, joista vapautuu vahvoja VOC-päästöjä).

Tälle ryhmälle suunnattu rakentaminen on näin ollen yleisesti laadukasta, terveyshaitoiltaan tarkasteltua rakentamista. Keinoja tähän ovat mm. kuiva rakentamistapa, haitallisimpien aineiden vähentäminen rakennustuotteissa, riskirakenteiden välttäminen suunnittelussa sekä rakentamisen laadukas käytännön toteutus. Laadukkaasta ylläpidosta tulee myös luonnollisesti huolehtia.

2.2 Toisen asteen sisäilmasairas – herkistyneille soveltuva rakentaminen

Jos ensimmäisen asteen sisäilmasairaahan altistumiskierrettä ei onnistuta katkaisemaan, alkava oireilu voi kroonistua pysyvämmäksi sairastumiseksi ja oireet muuttua vakavammiksi ja moninaisemmiksi. Toisen asteen sisäilmasairas on ehtinyt herkistyä ympäristötekijöille, kuten kemikaaleille tai luonnonhomeille. Näin ollen toisen asteen sisäilmasairas oireilee usein terveyshaittaa aiheuttaville tekijöille tavallista nopeammin ja terveydentilaan voivat vaikuttaa myös väestötason terveyshaittaa vähäisemmät ympäristötekijät. Terveissä tiloissa oireet poistuvat, mutta uusiutuvat helposti, jos altistuksia tulee.

Toisen asteen sisäilmasairaalla on usein puhjennut autoimmuunisairauksia, allergioita, suolisto- ja kilpirauhasongelmia tai keuhkosairauksia. Yksittäiset oireet ovat aiempaa moninaisempia, esim. nivelten jäykistyminen, kipu silmiä liikuteltaessa, raajojen tunnottomuus, jatkuva lämpöily, nenäverenvuoto ja muistihäiriöt ovat yleisiä tässä ryhmässä.

Toisen asteen sisäilmasairas on nk. työpaikkakyvytön: hän voi toimia täysitehoisesti työelämässä, jos terveelliset tilat löytyvät. Sopivia tiloja asumiseen, opiskeluun ja työntekoon on kuitenkin käytännössä hankala löytää.

Tälle ryhmälle kohdennetussa rakentamisessa tulee huomioida tekijöitä ”normaalia terveellistä rakentamista” tarkemmin.

Tämä tarkoittaa, että yleiset rakennusterveyttä edistävät toimet, kuten ensimmäiselläkin asteella, ovat tärkeitä, mutta tämän lisäksi tulee käyttää erityisen vähäpäästöisiä materiaaleja ja eliminoida muut haitalliset ympäristötekijät (mm. sijainnin ja irtaimiston aiheuttamat).

Toisen asteen sisäilmasairaille voidaan rakentaa ryhmätasolla, kun em. tekijät huomioidaan tarkasti, ts. rakentamisen ei tarvitse olla yksilöllisesti räätälöityä.

2.3 Kolmannen asteen sisäilmasairas – yksilöllinen rakentaminen

Kolmannen asteen sisäilmasairas on vakavasti sairas ja herkistynyt monipuolisesti erilaisille ympäristötekijöille. Useat altisteet aiheuttavat hyvin pieninäkin määrinä invalidisoivaa haittaa, ja henkilö kärsii hyvin vakavista oireista.

Tyypillisiä oireita tässä ryhmässä ovat mm. autoimmuunisairaudet, nk. ympäristöherkkydet kuten kemikaali- ja sähköherkkyys, erilaiset intoleranssit, alveoliitti, anafylaktiset shokit, ms-tyyppinen oireilu. Kognitiiviset häiriöt ja krooninen kipu ovat tavallisia. Muut yksittäiset oireet ovat moninaisia ja voivat olla invalidisoivia: mm. nivelvauriot, rytmihäiriöt, kuumepiikit, suupielten haavaumat, lihaskrampit, tajunnan häiriöt, oksentelu, verivirtsaisuus.

Kolmannen asteen sisäilmasairas on useimmiten työkyvytön erilaisten liitännäissairauksien ja voimakkaan herkistymisen vuoksi. Arjesta selviytyminen vie usein pääosan henkilön resursseista. Usein kolmannen asteen sairastunut on asunoton/muuttokierteessä, työtön, tuloton ja hänellä on taloudellisia ongelmia. Ongelmavyöhdin seurauksena moni uupuu ja masentuu.

Kolmannen asteen sisäilmasairas tarvitsee monialaista kokonaisvaltaista apua ja tukea, sisältäen mm. apuvälineitä. Erityisen tuen tarve voi myös vaikuttaa rakennuksen toimintojen suunnittelutarpeeseen.

Rakennettaessa kolmannen asteen sisäilmasairaalle tulee huomioida samat periaatteet kuin ryhmällä kaksi, mutta lisäksi ratkaisujen täytyy yksilöllisesti vaihtelevien herkistymisten vuoksi olla tapauskohtaisesti räätälöityjä. Yhdelle esimerkiksi polyuretaani saattaa olla ainoa soveltuva eristemateriaali, kun taas toiselle se aiheuttaa akuutteja terveysongelmia.

3. Rakennusten ongelmia sisäilmasairaiden kannalta

Sisäilmasairauksia käsiteltäessä voidaan huomioida rakennuksia kahden tyyppisesti:

- rakennukset, jotka aiheuttavat uusia sairastumisia
- rakennukset, jotka eivät aiheuta uusia sairastumisia, mutta eivät sovi jo sairastuneille (”väestötasolla terveellinen, mutta ei sovi herkistyneelle”).

Sisäilmasta sairastuneen henkilön oirekuva voi vaihdella rakennuksesta toiseen riippuen siitä, mille hän kulloinkin altistuu. Lisäksi on osin yksilöllistä, minkälaiset tekijät kullekin sairastuneelle aiheuttavat oireita.

Sisäilmasairaalle rakennusten käyttörajoitteita aiheuttavat esimerkiksi home- ja kosteusvauriot, haitalliset aineet rakennusmateriaaleissa ja muu rakennettuun ympäristöön liittyvä altistuminen (esim. rakennuksen sijainti ongelmallisen päästölähteen läheisyydessä, irtaimistosta sisäilmaan emittoituvat tai rakennuksen käyttäjien mukanaan tuomat epäpuhtaudet, ilmanvaihdon ongelmiin liittyvä oireilu).

Ongelmakiinteistöjä on kaikilla aikakausilla ja kaikenlaisista materiaaleista rakennetuissa rakennuksissa, eikä vastaavasti millään yksittäisellä materiaali- tai rakennustyyppivalinnalla voida löytää yleispäteviä ratkaisuja monisyiseen ongelmaan.

Toistaiseksi mikään yksittäinen sertifikaatti, luokitus, standardi tai ohje ei kuvaa sisäilmasairaille soveltuvaa rakentamista tai toimi tarvittavalla tasolla ja kattavuudella esimerkiksi soveltuvia rakennusmateriaaleja ja -tapoja erittelevänä työkaluna. Tilanne on tämän vuoksi rakentajille, suunnittelijoille ja sairastuneille itselleen haastava. Aiheesta tarvitaan luotettavaa ja jäsenneltyä uutta tietoa.

3.1 Monitekijäisyyden haasteita

Kyselytutkimuksin on hankala saada yksityiskohtaista tietoa siitä, mitkä tekijät tarkalleen ottaen ovat sisäilmasairaille rakentamisessa ongelmallisia. Eri materiaalien, niiden sisältämien ainesosien, rakennus- ja käyttötapojen kirjo rakennuksissa on niin valtava, ettei ongelmien lähteen tarkka ja luotettava identifioiminen ole useimmiten sairastuneille mahdollista.

Tiettyjä yleisesti sisäilmasairaille ongelmallisia materiaalityyppejä on hahmotettavissa (esim. laminaatit, muovimatot, betoni, kipsilevyt), mutta pääasiallisesti rakennustuotteiden sisältämät aineet ja niiden valmistus- ja käyttötavat vaihtelevat tuoteryhmittäin ja muutoin tapauskohtaisesti (mm. rakennuksen toteutus ja ylläpito) niin paljon, että tietoa toimivista ratkaisuista on kyettävä keräämään toisella tavoin.

Vastaavasti myös sisäilmasairaille suunnattuja onnistuneita tilaratkaisuja on vielä sen verran vähän, että vertailukelpoista tietoa toimivista ratkaisuista on hankala saada.

Tietojemme mukaan Suomesta löytyy jonkin verran erityisrakennettuja sisäilmasairaille suunnattuja kokeiluja, jotka eivät ole tuottaneet toivottavaa tulosta, ja yksittäisiä kokeiluja, jotka ovat toimineet vakavastikin sisäilmasairaiden tiloissa. Vertailukelpoista koottua tietoa näistä ei ole, eikä pidemmän aikavälin seuranta ole toteutettu.

Yleisesti ottaen toisen ja kolmannen asteen sisäilmasairaiden on tällä hetkellä haastavaa löytää tiloja, jotka eivät ylläpitäisi oireilua.

3.2 Prosessisidonnaista tarkastelua

Lähtökohtaisesti mikä tahansa materiaalityyppi voi olla soveltuva tai soveltumaton, riippuen kunkin materiaalin tarkemmasta kemiallisesta koostumuksesta, valmistustavoista ja käyttöympäristöstä. Toki tietyissä materiaalityypeissä soveltuvuus on todennäköisempää kuin toisissa. Sisäilmasairaille soveltuva rakentaminen ei kuitenkaan ole pelkästään materiaali- vaan pitkälti prosessisidonnaista.

Esimerkiksi puun soveltuvuus sisäilmasairaahan rakennusmateriaaliksi riippuu pitkälti siitä, millä tavoin puu on rakennustuotteeksi prosessoitu, millä tavoin rakennus on rakennettu ja ylläpidetty. Onko esimerkiksi kyse käsittelemättömästä, kuivissa olosuhteissa säilytetystä, kosteusvaurioitumattomasta hirrestä? Vai esim. homeenestoaineella käsitellystä lautatavarasta tai jonkinlaisesta puupuristelevystä, jossa puun ohella on lukuisia muita ainesosia? Kaikki nämä seikat vaikuttavat materiaalin mikrobialiseen ja kemialliseen koostumukseen ja siten soveltuvuuteen ympäristötekijöille reagoivalle henkilölle.

Näiden kysymysten ohella puun soveltuvuuteen vaikuttavat yksilölliset herkistymiset. Esimerkiksi osa kolmannen asteen sisäilmasairaista ei siedä puun luontaisia päästöjä, osalle taas tarkoin prosessoitu puu on ollut ainoa rakennusmateriaali, joka on osoittautunut sopivaksi.

4. Hajanaisuudesta kohti jäseneltyä kehittämistyötä

Jotta sisäilmasairaiden tilatarpeisiin voidaan vastata nykyistä tehokkaammin, tietoa sisäilmasairaille soveltuvista materiaaleista ja rakennustavoista tarvitaan huomattavasti nykyistä enemmän. Kyseessä on vääjäämättä pidempi tutkimus- ja kehitysprosessi.

Olemme esittäneet alustavan ehdotuksen sisäilmasairaalle soveltuvan rakennuksen peruseriaateiksi/reunaehdoiksi julkaisussa Kohti terveempää rakentamista [3].

Tietopankin keräämisen aloittaminen sekä onnistuneista että ongelmakohteista olisi ensiarvoisen tärkeää, jotta sisäilmasairaille suunnatussa rakentamisessa voidaan siirtyä kohti onnistuneita ratkaisuja ja hylätä sellaiset materiaalit, rakenteet ja menetelmät, jotka eivät pääasiallisesti toimi.

Tarvitaan koottua, yhtenevillä mittareilla kerättyä seurantatietoa sellaisista kohteista, joissa rakennuksen ”ainesosaluettelo” ja toteutustavat ovat selvillä. Kun sisäilmasairaille rakennetaan, on oleellista keskittyä mahdollisimman yksinkertaisiin rakenteisiin ja välttää monikerros- ja moniainerakentamista. Tekijöitä vähentämällä saadaan helpommin esiin korrelaatioita pitkällä aikavälillä, ja ongelmakohtia on mahdollista identifioida.

Seurantatiedon kokoamisessa myös sisäilmasairaiden asteluokituksen huomioiminen on tärkeää. Ensimmäisen asteen/terveen väestön oirekyselytieto ei ole vertailukelpoista herkistyneiltä kerättävään terveystietoon nähden.

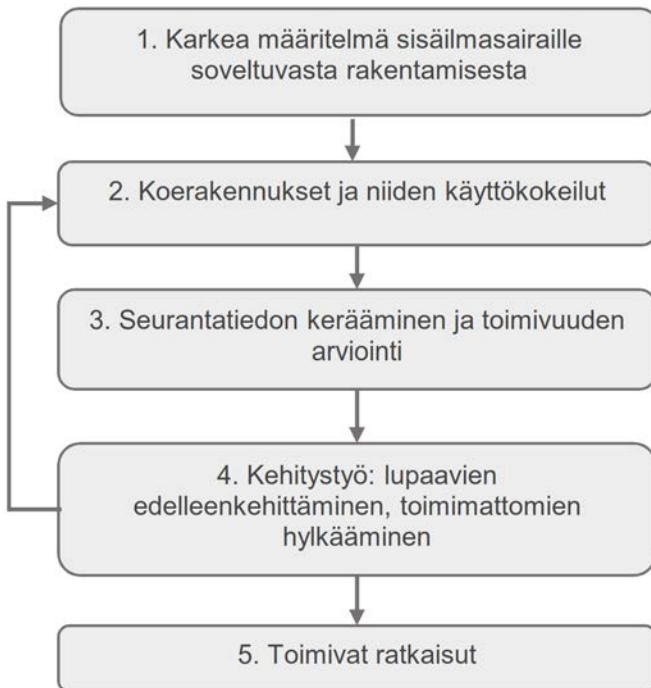
Samoin pitkän aikavälin seuranta tarvitaan. Rakennuksen ”terveydelliset elinkaaret” voivat olla hyvin vaihtelevia. Osa rakennuksista on ollut käyttökelpoisia sisäilmasairaille vain muutaman vuoden elinkaarensa alusta, osassa taas käyttöikä voi tähän tarkoitukseen alkaa vasta muutama vuosi valmistumisen jälkeen.

4.1 Viisivaiheinen kehittämispolku

Kehittämistyössä ratkaisuja voidaan edistää seuraavan polun avulla.

1. Määritetään sisäilmasairaille soveltuvan rakentamisen reunaehdot: pohditaan, millaiset rakennukset voisivat lähtökohtaisesti toimia ja millaiset voidaan nykykokemuksen valossa sulkea pois sisäilmasairaille suunnatun rakentamisen piiristä.
2. Tehdään koerakentamista näiden periaatteiden mukaan.

3. Kerätään kohteista seurantatietoa lyhyellä ja pitkällä aikavälillä niin rakenteista kuin käyttäjien terveydentilastakin.
4. Jätetään toimimattomat, laajoja ongelmakohtia sisältävät vaihtoehdot pois jatkokehityksen piiristä. Kehitetään lupaavia vaihtoehtoja.
5. Pidemmän kehitystyön tuloksena saadaan tietoa sisäilmasairaille sopivista rakennustyypeistä ja tätä kautta terveellisiä, sisäilmasairaille sopivia rakennuksia.



Kuva 1. Viisi vaihetta kohti tuloksekasta sisäilmasairaille soveltuvaa rakentamista.

5. Yhteenveto

Sisäilmasairaille suunnatussa rakentamisessa onnistuneita lopputuloksia voidaan saavuttaa pitkäjänteisen kehitystyön tuloksena. Rakennuskokeilut tulee suunnata lähtökohtaisesti järkeviin ja seurantakelpoiisiin ratkaisuihin. Kokeilukohteista tarvitaan koottua seurantatietoa niin käyttäjien terveyden kuin rakenteiden toimivuuden osalta.

Lähdeluettelo

- [1] Pulkkinen K. ja Pitkäniemi M. 2017. Sisäilmasairaahan toimintakyvyn tukeminen – ratkaisuja sairauden kolmella vakavuusasteella. Homepakolaiset ry:n julkaisu 2017. homepakolaiset.fi/ratkaisuja-sisailmasairaille/materiaalit/ratkaisumalli/
- [2] Tiina, Petri ja Veera – ensimmäisen, toisen ja kolmannen asteen sisäilmasairaat. Internet-sivu, 30.7.2017. homepakolaiset.fi/ratkaisuja-sisailmasairaille/sairauden-kolme-astetta
- [3] Kohti terveempää rakentamista – pohdintoja rakennusterveydestä ja sisäilmasairaiden tilaongelmista. Homepakolaiset ry:n julkaisu 2017. homepakolaiset.fi/ratkaisuja-sisailmasairaille/materiaalit/kohti-terveempaa-rakentamista

Elinkaarikoulujen pintapölyt ja siivottavuus

Leila Kakko
Tampereen ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Työsuojelurahaston rahoittamassa SEEK-hankkeessa paneuduttiin pääkaupunkiseudulla ja Itä-Suomessa sijaitsevien elinkaarikoulujen rakentamiseen, ylläpidon ja sisäympäristön laatuun sekä energian kulutukseen. Tutkimuksessa oli mukana 12 koulua, joista kuusi elinkaarikoulua ja verrokkikouluina myös kuusi koulua. Koulujen siivouksen laatua tutkittiin soveltaen INSTA 800 laatujärjestelmää pintapölymittausten osalta ja saatuja tuloksia verrattiin hyvän sisäilman raja-arvoihin pintapölyn osalta. Tilojen siivottavuus havainnoitiin ja se todennettiin valokuvaamalla. Pintapölymittausten tuloksissa ei ollut suuria eroja elinkaari- ja verrokkikoulujen välillä. Pintojen siivottavuuden suhteen koulut ja jopa luokat olivat erilaisia. Tilojen suunnittelussa pitäisi ottaa paremmin huomioon säilytystilojen tarve, tilojen muunneltavuus ja opetuksen tuomat haasteet.

1. Johdanto

Koulujen sisäilmaongelmat ovat viime vuosina puhuttaneet yleisesti ja syitä ongelmiin on haettu, milloin kosteus- ja homevaurioista, ilmanvaihdosta, puhtaanapidosta ja myös materiaalivalinnoista. Yhtenä mahdollisena ratkaisuna pidetään elinkaarimalin mukaista rakentamista, jossa palveluntuottaja yhdellä sopimuksella vastaa ainakin hankkeen suunnittelusta, rakentamisesta ja ylläpidosta pitkän sopimuskauden (10–40 vuoden) ajan.

Sisäilmasto-ongelmat havaitaan yleensä siitä, että rakennuksen käyttäjät alkavat oireilla ja kertoa vaivoistaan. Kouluissa esiintyviin oireisiin tulee suhtautua vakavasti, jos ne poistuvat tai lieventyvät silloin, kun työntekijät ovat poissa rakennuksesta, esimerkiksi viikonloppuisin ja loma-aikana. [1]

Standardissa SFS 5967 [2] siivous määritellään sisätiloissa tehtäväksi pintojen puhdistukseksi, suojaukseksi ja hoidoksi sekä erilaisiksi järjestelytoiksi, joissa puhtauden tuottaminen tapahtuu ammattimaisesti. Siivouksen laatuun liittyvässä INSTA 800 standardissa [3] määritellään siivouksen ja hyvän sisäilman suhde siten, että hyvä sisäilman laatu saavutetaan pintapölyn osalta, mikäli käytetään pölyisyystasoa 4. Tämä tarkoittaa esimerkiksi yläpölyissä sitä, että mitattu pölyn määrä ei saa olla yli 5 pölyisyysprosenttia.

Koulusiivouksessa haasteita muodostaa harvemmin puhdistettavia kohteet, joita ovat mm. avväligneet, ylätasot ja pystypinnat. Pintojen puhdistamattomuus aiheuttaa osaltaan vaikeita sisäilmaongelmia. [4] Harvoin siivottavat kohteet kuten ylätasopinnat pitäisi puhdistaa nykyistä useammin, jopa joka toinen kuukausi. [5] [6] Talotekniikkaan kuuluvien valaisimien ja päätelaiteiden puhdistusta ei ole otettu huomioon tilojen puhtaanapitoa suunniteltaessa. Jo suunnitteluvaiheessa tulisi huomioida, esim. ilmanvaihtokanavien pintojen profiilit. [7]

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia puhtaanapidon erovaisuuksia elinkaarikoulujen ja verrokkikoulujen välillä osana SEEK-hanketta.

2. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksessa oli kaikkiaan 12 koulua, joista puolet oli rakennettu tai peruskorjattu elinkaarimallin mukaisesti ja verrokkit olivat kaikki omarahoitteisia. Elinkaarikohteissa palveluntuottaja on vastuussa kiinteistönhoidosta ja ylläpidosta 25 vuoden ajan.

Kouluissa tehtiin erilaisia sisäilma- ja siivousmittauksia, rakennus- ja taloteknisiä katselmointeja ja sisäilmastokyselyitä lukuvuosien 2014-2016 aikana. Koulujen siivouksesta vastasi joko ulkopuolinen siivousliike tai kaupungin oma siivoustoimi. Kaupungin omassa siivouksessa oli sekä elinkaarikouluja, että verrokkeja.

2.1 Pintapölymittaukset kouluissa

Koulujen siivouksen tutkimisessa käytettiin pintapölyjen mittausta, joka tehtiin soveltaen INSTA 800 laatujärjestelmää. Käytettävä menetelmä vastasi siivousjärjestelmän tarkistuksen ohjeistusta muuten paitsi tutkittavien tilojen määrän osalta. Mittaukset tehtiin opettajainhuoneessa ja kahdessa luokassa.

Pintapölyjen mittaukseen käytettiin BM Dustdetectoria /2/ ja jokaisesta pintaluokasta (kehoa lähellä olevat pinnat, huonekalut ja kiintokalusteet ja kovat lattiat, joista kahdesta viimeisestä myös vaikeasti saavutettavat pinnat) kerättiin kolme geeliteippinäytettä, jolloin huoneen näytteiden kokonaismääräksi muodostui 15 näytettä. Näytekohdat valittiin niin, että ne olisivat mahdollisimman samankaltaiset kaikissa kohteissa. Pintaluokan pölykertymän keskiarvon tulosta verrattiin sisäilmastotason vaatimukseen.

2.2 Siivottavuuden havainnointi

Siivottavuutta havainnointiin sekä visuaalisesti, että valokuvaamalla. Kaikki näytteenottopisteet valokuvattiin, samoin kuvattiin pinnoilla näkyvää pölyä, mikäli sitä oli niin runsaasti, että se saatiin kuvassa näkyvään.

3. Tulokset ja niiden tarkastelu

3.1 Pintapölymittaukset

Siivouksen laatua mittaavien pintapölymittausten tulokset taulukoitiin kouluittain ja tiloittain. Tuloksista laskettiin keskiarvot pintakategorioittain. (taulukko 1).

Pintapölymittausten tuloksissa ei ollut suuria eroja elinkaari- ja verrokkikoulujen välillä. Mutta saman koulun sisällä saattoi eri tilojen välillä olla suuriakin eroja. Lisäksi samassa koulussa saattoi siivousta suorittaa useita eri yrityksiä. Eron syynä saattoi olla tilojen erilainen siivottavuus tai suoritettujen siivouksen ajankohta. Siivouksen ajankohta vaihteli eri kouluissa ja koska mittausajankohtaa ei onnistuttu vakioimaan suhteessa siivousajankohtaan, niin sen perusteella ei voi tehdä kovinkaan syvällisiä päätelmiä.

Yläpölyjen pintapölykertymät olivat suurimmat ja tämä näkyi lähes kaikissa kohteissa. Lattioiden pintapölykertymät olivat todella vähäisiä verrattaessa INSTA 800 standardissa määriteltyyn sisäilmatasoon, kuitenkin sisäilman kannalta tasopinnat ovat kriittisempiä pintoja verrattuna lattioihin.

Taulukko 1. Pintapölymittausten keskiarvot kouluittain ja pintakategorioittain.

Koulu	Kehoa lähellä olevat pinnat (1%) ¹	Huonekalut ja kiintokalusteet		Kovat lattiat	
		A ² (1,5%) ¹	NA ³ (5%) ¹	A(3) ¹	NA (5%) ¹
V 1	0,2	0,6	3,3	3,3	1,9
V 2	1,0	2,3	14,8	3,3	3,2
V 3	2,0	2,8	15,9	2,6	2,1
V 4	1,3	1,5	n.d	4,7	3,2
V 5	0,6	0,8	6,3	1,9	1,6
V 6	0,8	0,5	3,4	1,1	0,9
E 1	0,7	0,7	7,7	1,6	2,0
E 2	0,9	1,2	6,8	2,1	4,3
E 3	1,1	1,8	7,3	4,2	1,9
E 4	1,4	1,4	8,2	1,8	3,2
E 5	1,4	1,7	6,2	1,5	1,7
E 6	1,6	2,1	6,7	1,5	2,0

¹= INSTA 800 standardin määrittelemän sisäilmaston (4) sallima pölyisyys % pintaluokittain

A²= Helposti tavoitettava pinta NA³= Vaikeasti tavoitettava pinta

n.d.= pinta ei ollut saavutettavissa, ei mitattu

3.2 Siivottavuuden havainnointi

Tilojen siivottavuus vaihteli paljon. Oli tiloja, joissa ei ollut mitään ylimääräistä ja vastaavasti luokkia, joissa oli kaikkea mahdollista ylimääräistä, mattoja, huonekaluja ja vaikka halkoja tms. Merkittävää oli, että kyseiset erot näkyivät jopa saman koulun sisällä. Toinen havaittu ongelma liittyi kunnollisten säilytystilojen puutteeseen, eli kaikki mahdolliset pinnat olivat täynnä askartelutarvikkeita tms., sillä luokassa ei yksinkertaisesti ollut soveltuvia tiloja tarvikkeille.



Kuva 1. Yläpölyjen siivottavuus.

Yläpölyjen puhdistettavuutta haittasi kaappien päällä olevat tavarakasat, joista osa vaikutti olevan aivan väärässä paikassa. Eli harvemmin käytettävät esim. kausituotteet voisi säilyttää luokkatilojen sijaan, vaikka varastoissa.

Kouluja kierrettäessä voitiin myös havaita se, että digitalisoinnin muuttama opetus ja oppiminen vaativat silti varsinkin pienempien lasten luokkiin askarteluvälineitä yms., joille olisi hyvä olla selkeät säilytyspaikat. Tavaraa oli myös korkeiden kaappien päällä, jolloin pinnan puhdistaminen on suhteellisen hankalaa ja vaatii lisävälineitä. Tänä päivänä myös työsuojelumääräykset

sanelevat sen mitä siivoaja saa tehdä. Osassa kouluja ulkokengät säilytetään esim. eteistiloissa olevissa lokerikoissa, jolloin jalkojen mukana ei likaa kulkeudu peremmälle tiloihin, jolloin pintojen likaantuminen on vähäisempää.

4. Yhteenveto

Tilojen suunnittelussa tulisi paremmin huomioida säilytystilojen tarve ja esivalmistellun siivouksen mahdollistaminen, panostamalla riittäviin siivouskeskuksiin ja niiden varusteisiin. Talotekniikkaan kuuluvien valaisimien ja päätelaiteiden puhdistus pitäisi suunnitella osaksi tilojen puhtaanapitoa ja jo suunnitteluvaiheessa tulisi huomioida, esim. ilmanvaihtokanavien pintojen profiilit. Yhteistyön eri tahojen välillä tulisi toimia saumattomasti.

Pintapölynkertymisen suurin haaste ovat vaikeasti siivottavat pinnat, kuten ylhäällä olevat pinnat, joille pölyä pääsee kertymään ja lähipinnat, joita ei pysty pyyhkimään liiallisen tavarankuormituksen vuoksi. Nyt samassa koulussa saattaa olla useita eri toimijoita ilman, että selkeä työnjako olisi selvillä.

Laatustandardin käytön soisi lisääntyvän, erityisesti huomioiden pintapölyn sisäilmaston laatuvaatimukset. Tässä tutkimuksessa tarkastettavia tiloja olisi voinut olla enemmänkin mutta välttämättä se ei olisi tuonut lisäarvoa. Edellisen siivouksen ajankohdan tietäminen olisi helpottanut tulosten tulkintaa. Hankeen loppuraportti on saatavissa Työterveyslaitoksen sivuilta [8].

Lähdeluettelo

- [1] Meklin, T. Putus, T., Hyvärinen, A., Haverinen-Shaughnessy, U., Lignell, U. & Nevalainen, A. 2008. Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot. Opas ongelmien selvittämiseen. Kansanterveyslaitoksen julkaisuja. Helsinki
- [2] SFS 5967. 2010. Puhtausalan sanasto.
- [3] SFS 5994. 2012. Siivouksen tekninen laatu. Mittaus ja arviointijärjestelmä (INSTA 800:2010). Suomen Standardoimisliiton julkaisuja. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- [4] Reunanen, R. 2009. Koulut ja oppilaitokset. Teoksessa Valkosalo, T. (toim.) Siivoustyön käsikirja. 20. uudistettu painos. Suomen Siivousteknisen liiton julkaisuja 1:7. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 247
- [5] Korhonen, E. 2011. Puhtauspalvelut ja työympäristö. Ostettujen siivouspalveluiden laadun mittausmenetelmät ja laatu sekä siivouksen vaikutukset sisäilman laatuun, tilojen käyttäjien kokemaan terveyteen ja työn tehokkuuteen toimistorakennuksissa. Jyväskylän yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Väitöskirja.
- [6] Pesonen-Leinonen, E. 2008. Paljonko pölyä sallitaan pinnoilla? Puhtaus & Palvelusektori 4/2008
- [7] Vänskä, S. 2016. Puhdistettava talotekniikka: Siivouksen ja talotekniikan yhteisvaikutus koulurakennusten sisäilmastoon.
- [8] <http://www.julkari.fi/handle/10024/131824>

B6. Sisäilmatutkimukset

Uusi sisäilman laadun tutkimusmenetelmä

Elisa Aattela

Sisäilmatutkimuspalvelut Elisa Aattela Oy

Tiivistelmä

Sisäilman laadun tutkimus on saanut uuden näytteenottomenetelmän, joka perustuu suoraan ilmasta kylmälle pinnalle kerättyyn huurrevesinäytteeseen. Näytteen toksisuus on tutkittu ensimmäisen kerran ihmisen makrofagisolulla FICAM laboratorioissa. Analyysin tuloksena saadaan kuolleiden solujen määrä prosenttilukuna, jonka mukaan voidaan määrittää toksisuusluokka. Kahdessa tutkimuksessa, Suomessa ja Teksasissa, otettiin huurrevesinäytteitä uudella sisäilman laadun mittausmenetelmällä. Tulosten perusteella sisäilman laadussa havaittiin huurrevesinäytteiden aiheuttavan solukuolemaa. Sisäilman myrkyllisyys uusissa rakennuksissa ei todennäköisesti aiheudu kosteus- ja mikrobivaurioista vaan uusien materiaalien sisältämistä biosideistä, jotka vapautuvat sisäilmaan.

1. Johdanto

Sisäilmastoseminaarissa maaliskuussa 2013 julkaistiin Toxtest-tutkimushankkeesta tehty loppupäätelmä, jossa todettiin, että sisäilman toksisuutta eli myrkyllisyyttä kannattaisi tutkia suoraan sisäilmasta eikä sisäilman pölyistä. Näytteen aktiivinen kerääminen esimerkiksi suoraan ilmasta voisi olla pölynäytettä suositeltavampi näytteenkeräystapa. [1] Aalto-yliopistossa julkaistiin keväällä 2014 Johanna Salon diplomityö, jossa oli tutkittu sisäilman toksisuutta keräämällä kondenssivettä sisäilmasta [2]. Tämän innoittamana syntyi syksyllä 2014 kehitystyön tuloksena uusi innovatiivinen ajatus kerätä sisäilmasta vettä huurruttamalla ja tutkia siitä sisäilman myrkyllisyyttä.

Menetelmän tutkimista varten muodostettiin Helsingin ja Turun yliopistojen sekä Sisäilmatutkimuspalvelut Elisa Aattela Oy:n kanssa E-hanke. Hankkeen tavoitteena oli kehittää sisäilmatutkimusmenetelmä, jota voidaan käyttää ympärivuotisesti ja jolla saadaan tuotettua luotettavia, toistettavia ja yhdenmukaisia analyyseja eri laboratorioissa. Uuden mittausmenetelmän testauksessa käytettiin todellisia sisäilmahaittaisia kohteita ympäri Suomea. Kaikkien 30 tutkitun kohteen henkilöt kokivat tyypillisiä sisäilmasta johtuvia oireita. Identtiset näytteet analysoitiin Helsingin ja Turun yliopistojen laboratorioissa. Tulosten mukaan menetelmä osoittautui soveltuvaksi solutoksikologisiin mittauksiin ja kemialliseen toksinanalytiikkaan. Yhteenveto tuloksista julkaistiin Sisäilmastoseminaarissa maaliskuussa 2016 [3] sekä kansainvälisessä Indoor Air -konferenssissa Belgiassa 2016 [4].

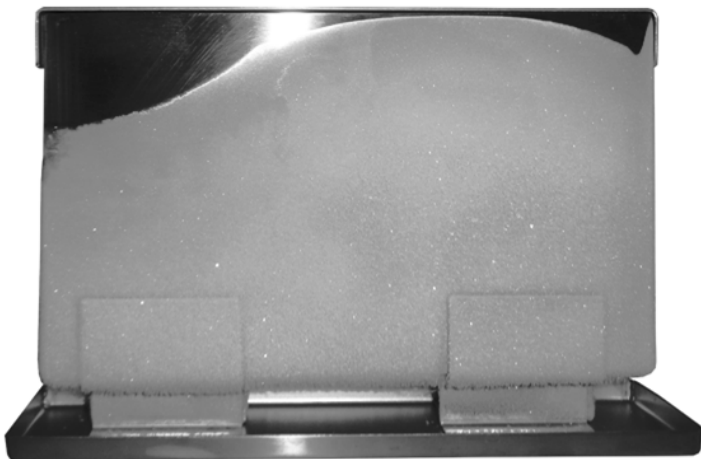
Uudella näytteenottomenetelmällä eli E-keräimellä sisäilmasta kerätty vesihöyry edustaa tilan käyttäjien hengitysilman laatua. Näytteestä voidaan tutkia ilman sisältämiä nestemäisiä epäpuhtauksia ja se tuottaa täysin uutta tietoa sisäilman laadusta. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, onko rakennusten sisäilma myrkyllistä esittämällä huurrevesinäyttein saatuja ja ihmisen makrofagisolulla analysoituja tutkimustuloksia.

2. Sisäilman laadun tutkiminen eri-ikäisissä rakennuksissa

Eri-ikäisten rakennusten sisäilman laatua tutkittiin suomalaisista uusista omakotitaloista ja texasilaisista eri-ikäisistä rakennuksista. Tutkimus tehtiin yhteistyössä Tampereen yliopiston solututkimus- ja testauslaboratorio FICAM:in kanssa vuonna 2016. Sisäilman toksisuusanalyysitestaus voitiin tehdä ensimmäistä kertaa ihmisluilla. Suomalaisissa kohteissa huurrevesinäytteet kerättiin 26 uudesta omakotitalosta ja analyysit tehtiin kahdella ihmisluutyypillä: immuunisolu makrofagilla ja yleisellä sidekudossolulla fibroblastilla. Texasin yliopistossa tehty sisäilman laadun tutkimus käsitti 20 kohdetta. Huurrevesinäytteet analysoitiin myös FICAM-laboratoriossa Tampereella.

2.1 Uusi sisäilman laadun tutkimusmenetelmä

Uudessa sisäilmatutkimusmenetelmässä kerätään E-keräimen kylmälle pinnalle sisäilman vesimolekyylejä (Kuva 1). Ensin teräslaatikon sisälle sijoitetaan -79 °C hiilihappojäätä. Sisäilmassa olevat kaasumaiset vesimolekyylit härmistyvät kylmään pintaan huurteeksi ja kun hiilihappojää poistetaan, huurtuminen loppuu. Huurre muuttuu nesteeksi huoneenlämmössä ja valuu teräslaatikon alla olevalle tarjottimelle. Siitä vesi siirretään näytepulloon ja toimitetaan laboratorioon analysoitavaksi.



Kuva 1. E-keräin.

2.2 Näytteiden analysointi

FICAM-laboratoriossa huurrevesinäytteet annostellaan 1:10 laimennoksina ihmisen makrofagisoluille. Jokaisesta näytteestä tehdään kuusi rinnakkaista testiä. Altistusaika on 24 tuntia ja kontrollina käytetään steriiliä tislattua vettä. Toksisuus mitataan käyttämällä WST-1-testiä, jolla selvitetään elävien solujen määrä altistusajan jälkeen.

Tulokset testataan tilastollisesti ja satunnaisvaikutuksen eli yksittäisten mittaustuloksien epätarkkuudesta aiheutuvien vaikutuksien todennäköisyyttä kuvataan P-arvolla. Tilastollisesti merkitsevien tulosten P-arvo on pienempi kuin 0,05. [5] Huurrevesinäyte tulkitaan toksiseksi, mikäli P-arvo on tilastoanalyysissä $< 0,05$. Toksisuus jaetaan lisäksi toksisuusluokkiin Taulukon 1 mukaisesti. Esimerkiksi yhden tähden (*) luokittelussa huurrevesinäyte tappaa soluista korkeintaan 10 %.

Taulukko 1. Toksisuusluokittelu.

Toksisuusluokka	Solujen kuolleisuus verrattuna kontrollisoluihin
*	1-10 %
**	11-20 %
***	21-30 %

3. Tulokset

Tutkimustulosten mukaan 26 uuden omakotitalon sisäilman laadussa oli tekijöitä, jotka vaikuttivat sisäilman laatuun (Taulukko 2). Kahdeksassa huurrevesinäytteessä tapahtui solukuolemaa. Puhtaita rakennuksia toksisuuden osalta oli 69 %. Yksi huurrevesinäytteen tulos osoitti kolmea tähteä (***), toiseen luokkaan (**) sijoittui neljä kohdetta ja yhden tähden (*) kohteita oli kolme kappaletta. Sisäilman toksisuus eli myrkyllisyys uusissa rakennuksissa ei todennäköisesti aiheudu kosteus- ja mikrobivaurioista vaan uusien materiaalien sisältämistä biosideistä, jotka vapautuvat sisäilmaan.

Taulukossa 2 vertailunäytteitä edustavat FICAM:in koodit 9, ja 27, jotka on otettu ulkoilmasta. Taulukossa 2 esitetään myös yhden ja kolmen tunnin altistusajan tulokset.

Texasin eri-ikäisten rakennusten sisäilman laadun tutkimuksessa 20 huurrevesinäytteestä 13:sta oli solukuolemaa (Taulukko 3). Puhtaita tutkittuja tiloja oli vain 30 %. Kolmen tähden (***) kohteita oli kolme kpl, kahden tähden (**) kohteita oli neljä kpl ja yhden tähden (*) kohteita oli kuusi kpl.

Taulukossa 3 vertailunäytteitä edustavat FICAM:in koodit 2, 9 ja 19, jotka on otettu ulkoilmasta. Yhden vertailunäytteen tulos on toksinen, koska myös ulkoilmassa voi olla toksisuutta. Taulukossa 3 esitetään myös yhden tunnin altistusajan tulokset.

Taulukko 2. Suomalaisten uusien omakotitalojen sisäilman laadun tutkimus syksyllä 2016.

FICAM:in koodi	Toksinen THP-1 makrofageille KYLLÄ/EI			Toksinen BJ fibroblasteille KYLLÄ/EI			Toksisuusluokka
	1 h	3 h	24 h	1 h	3 h	24 h	
1	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
2	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
3	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
4	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
5	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
6	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
7	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
8	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
9	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
10	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
11	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
12	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
13	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
14	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
15	EI	EI	KYLLÄ 15,40 ± 3,10 (P = 0,034)	EI	EI	EI	**
16	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
17	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
18	EI	EI	EI	KYLLÄ 9,10 ± 7,50 (P = 0,154)	EI	EI	*
19	EI	EI	KYLLÄ 7,50 ± 8,80 (P = 0,014)	EI	EI	EI	*
20	EI	EI	KYLLÄ 16,60 ± 5,10 (P < 0,001)	KYLLÄ 21,20 ± 5,20 (P < 0,001)	EI	EI	***
21	EI	EI	KYLLÄ 10,60 ± 1,70 (P < 0,001)	EI	EI	EI	**
22	EI	EI	KYLLÄ 11,00 ± 1,80 (P < 0,001)	EI	EI	EI	**
23	EI	EI	KYLLÄ 9,00 ± 8,40 (P = 0,028)	EI	EI	EI	*
24	EI	EI	KYLLÄ 13,70 ± 3,50 (P < 0,001)	EI	EI	EI	**
25	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
26	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
27	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
28	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen
29	EI	EI	EI	EI	EI	EI	Ei toksinen

Taulukko 3. Texasilaisten eri-ikäisten rakennusten sisäilman laadun tutkimus tammikuussa 2017.

FICAM:in koodi	Toksinen THP-1 makrofageille KYLLÄ/EI [%]		Toksinen BJ fibroblasteille KYLLÄ/EI [%]		Toksisuusluokka
	1 h	24 h	1 h	24 h	
1		KYLLÄ 22,4 ± 7,4 (P < 0,001)	KYLLÄ 14,8 ± 10,7 (P = 0,007)	KYLLÄ 15,3 ± 7,3 (P < 0,001)	***
2		KYLLÄ 8,6 ± 1,8 (P = 0,006)	EI	EI	*
3		KYLLÄ 5,9 ± 3,1 (P = 0,016)	EI	KYLLÄ 13,7 ± 2,1 (P < 0,001)	**
4		KYLLÄ 10,0 ± 4,1 (P = 0,001)	EI	KYLLÄ 13,0 ± 4,4 (P < 0,001)	**
5		KYLLÄ 27,5 ± 14,7 (P < 0,001)	EI	EI	***
6	KYLLÄ 20,1 ± 16,0 (P = 0,021)	KYLLÄ 14,1 ± 0,7 (P < 0,001)	EI	EI	***
7		KYLLÄ 7,6 ± 3,1 (P = 0,004)	EI	EI	*
8		KYLLÄ 5,5 ± 2,9 (P = 0,021)	EI	EI	*
9		EI	EI	EI	Ei toksinen
10		KYLLÄ 9,7 ± 3,3 (P < 0,001)	EI	EI	*
11		KYLLÄ 5,9 ± 4,3 (P = 0,026)	EI	EI	*
12		KYLLÄ 10,0 ± 6,2 (P = 0,002)	EI	EI	*
13		EI	EI	KYLLÄ 9,5 ± 8,7 (P = 0,04)	*
14		KYLLÄ 12,5 ± 11,0 (P = 0,002)	EI	KYLLÄ 6,8 ± 10,1 (P = 0,032)	**
15		EI	EI	EI	Ei toksinen
16		KYLLÄ 19,2 ± 10,2 (P = 0,001)	EI	EI	**
17		EI	EI	EI	Ei toksinen
18		EI	EI	EI	Ei toksinen
19		EI	EI	EI	Ei toksinen
20		EI	EI	EI	Ei toksinen

4. Yhteenveto

Sisäilman kokonaistoksisuus voi muodostua mikrobien aineenvaihdunnan tuottamista toksineista, materiaalien sisältämistä biosideista ja puhdistusaineiden biosideista. Tutkituissa rakennuksissa on todennäköisesti piileviä kosteus- ja mikrobivaurioita, mikrobien aineenvaihduntatuotteina vapautuvia toksineja ja mahdollisesti pieni määrä tiloissa käytettyjen puhdistusaineiden soluja tappavia aineita. Testaamatta on vielä monet aineet, kuten palonestoaineet ja arjen kemikaalit, joita käytämme päivittäin kotona ja työpaikoilla. Oman lisänsä sisäilman laadun toksisuuteen antaa koneellisen ilmanvaihdon kautta syntyvät epäpuhtaudet.

Uusien rakennusten osalta olisi hyvä tehdä uusintamittaus vuoden päästä ensimmäisen mittauksen jälkeen ja seuraavan kerran neljän vuoden päästä. Vertaamalla kahden aikapisteen näytettä voidaan selvittää, kumpaan suuntaa sisäilman laatu on lähtenyt kehittymään. Vanhojen rakennusten osalta korjaustyön jälkeen tehtävä uusintamittaus paljastaa korjaustyön onnistumisen. Näytteenotto suoraan hengitettävästä sisäilmasta ja sen analysointi ihmisen makrofagisolulla antaa kuvan siitä, mitä myrkyllinen sisäilma saa aikaan ihmisen elimistössä.

Sisäilman laatua selvitetään myös tulevissa tutkimushankkeissa. Huurrevesinäytteen sisäilman toksisuuden tarkempaa jaottelua eri epäpuhtauksiin selvitetään Tampereen Ammattikorkeakoulun Aerosoli-hankkeessa. SIBI-hankkeessa selvitetään koulujen ja päiväkotien sisäilmasta puhdistusaineiden ja rakennusmateriaalien biosidien vaikutusta.

Lähdeluettelo

- [1] Sosiaali- ja terveysministeriö. Kosteusvaurioituneiden rakennusten tunnistamiseen ei uutta menetelmää. Tiedote 42/2013.
- [2] Salo, J. 2014. Rakennuksen homeiden aineenvaihduntatuotteiden mittaamiseen perustuvan analytiikan kehittäminen. Diplomityö. Rakennustekniikan laitos, Aalto-yliopisto. 106 sivua.
- [3] Andersson, M., Aattela, E., Mikkola, R., Atosuo, J., Lilius, E.-M., Suominen, E., Lehtinen, S., Viljanen, M., Salkinoja-Salonen, M. (2016). Uusia sisäilman tutkimusmenetelmiä. Sisäilmastoseminaari, SIY raportti 34, s.295-300.
- [4] Atosuo, J., Suominen, E., Aattela, E., Lilius, E.-M. Assessing the indoor air toxicity from the condensed water. *Indoor Air*, 2016. p. 204–211.
- [5] Tuomisto, J. Tutkimustulosten tulkinta. Ympäristöterveys – www.oppimateriaali.fi.
http://web.archive.org/web/20050112140549/http://www.uku.fi/avoin/ymp_terveys/oppimateriaali/tutkimus/tutkim5_tulkinta.html

Uusi menetelmä sisäilmaongelmaisten rakennusten priorisointiin

Julia Debbbarh
Sisäilmaputiikki

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli kehittää menetelmä sisäilmaongelmaisten rakennusten priorisoimiseksi terveellisyyden perusteella nopeasti ja edullisesti. Testattavaksi menetelmäksi valittiin henkilökunnalle suunnattu kysely ja laskentamenetelmä, joka tuottaa kullekin kohteelle vertailukelpoisen, rakennuksen terveellisyyttä kuvaavan lukuarvon. Menetelmää testattiin 15 koulussa, joista kahdeksan edusti vaurioituneita ja seitsemän vaurioitumattomia rakennuksia. Menetelmä erotteli vaurioituneet rakennukset vaurioitumattomista. Lisäksi asetetut ehdot nopeudesta ja edullisuudesta toteutuivat. Teoreettisen tarkastelun perusteella menetelmän arvioitiin soveltuvan karkeaan priorisointiin sellaisissa kohteissa, joissa kullakin työntekijällä on oma pääasiallinen työtila.

1. Johdanto

Kiinteistön omistajien niukat resurssit ovat johtaneet siihen, että rakennuksia ei kyetä tutkimaan välittömästi perusteellisesti sisäilmaongelmaepäilyn tullessa esille. Tutkimusten viivästyminen johtaa myös korjausten viivästyneeseen. Vähäiset resurssit on järkevää kohdentaa pikaisesti sellaisiin rakennuksiin, joiden korjaamisella voidaan pienentää sisäilmaongelmien aiheuttamaa riskiä terveydelle sekä vähentää sisäilmaongelmista aiheutuvia välillisiä kuluja (esim. sairauspoissaoloista aiheutuneet kulut) ja parantaa työntekijöiden tuottavuutta. Pahimmat ongelmarakennukset pitäisi voida onnistuneesti poimia nopeasti kaikkien ongelmaepäilykohteiden joukosta eli priorisoida terveellisyyden mukaan.

Priorisointi edellyttää riittäviä ja samanarvoisia tietoja rakennuksista. Nykyiset menetelmät rakennuksia koskevan tiedon hankinnassa ovat pääasiassa hitaita ja työläitä johtaen korkeahkoihin kustannuksiin eivätkä näin palvele erityisen hyvin käytännön työelämää. Tämän opinnäytetyön taustalla on käytännön kokemuksen kautta hankittu tuntuma siitä, että käyttäjien kokemukset tilojen terveellisyydestä todennäköisesti vastaavat varsin hyvin sitä tietoa rakennuksen terveellisyydestä, joka saadaan sisäilmatutkimuksin. Tästä muodostui myös tutkimuskysymykseksi se, voisiko yksistään käyttäjien kokemusten ja havaintojen perusteella priorisoida rakennuksia terveellisyyden mukaan. Tätä ajatusta tuki myös kirjallisuudessa esiin nousseet näkemykset käyttäjälähtöisyyden tärkeydestä [1, 2].

2. Työn tavoite ja rajaukset

Työn tavoitteena oli kehittää menetelmä, jonka avulla sisäilmaongelmaisia rakennuksia voidaan priorisoida terveellisyyden perusteella nopeasti ja edullisesti. Edulliseksi määriteltiin menetelmä, jossa yhden kohteen priorisoinnista aiheutuvat tilauskustannukset ulkopuoliselta palveluntarjoajalta ovat enintään noin 500 euroa (ALV 0 %). Tilaajan kannalta katsottuna on merkittävää, ettei tilaajalta kulu juurikaan työaika priorisointiin ja ehdoksi asetettiin, että yhden kohteen priorisointiin saisi tilaajalta kuluu aikaa enintään kaksi tuntia rakennusta kohden.

Tarkasteltaviksi kohteiksi rajattiin vain koulut. Kouluissa kyselyn piiriin valittiin opetushenkilökunta ja siihen rinnastettavat työntekijät (esim. sihteerit, psykologit). Keittiöhenkilökunta ja siivoojat rajattiin pois, sillä näiden ammattiryhmien työ voi jo itsessään aiheuttaa oireilua aiheuttaen enemmän virhettä tuloksiin.

Tässä työssä keskityttiin kunkin terveyshaittatekijän ensisijaisiin vaikutuksiin. Esimerkiksi lämpötilan ensisijainen vaikutus on tässä työssä tilojen käyttäjien kokemat lämpöolosuhteet ja toissijaisena vaikutuksena pidetään vaikutusta esimerkiksi materiaalipäästöihin.

3. Henkilökunnalle suunnattu kysely

Kyselyssä oli kaikkiaan 39 kysymystä, joista lukuarvon laskennassa huomioitiin 22 kysymystä. Nämä kysymykset ovat haittatekijöihin ja oireiluun suoraan liittyviä. Muut kysymykset ovat taustakysymyksiä tai tarkoitettu luotettavuuden arviointiin eikä niitä ollut tarkoituksenmukaista huomioida lukuarvon laskennassa.

Terveyshaittatekijöiksi valittiin sellaiset tekijät, joiden on niin valtakunnallisesti kuin kansainvälisesti arvioitu vaikuttavan ihmisen terveyteen [3, 4, 5, 6]. Näitä tekijöitä ovat ilmanvaihtuvuus, lämpötila ja veto, ilmankosteus, rakennekosteus, melu ja akustiikka, valaistus, mikrobit, haihtuvat orgaaniset ja epäorgaaniset yhdisteet, viemärikaasut sekä pöly (sis. kuidut). Radon rajattiin pois sen haitallisuudesta huolimatta, sillä sitä tilojen käyttäjät eivät pysty aistimaan millään tavalla.

Kysymysten laadinnan lähtökohta oli se, millaiset aistinvaraiset havainnot indikoivat terveyshaittatekijöissä esiintyviä poikkeamia ja millaisia aistinvaraisia havaintoja käyttäjä pystyy näiden poikkeamien olemassaolosta tekemään. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta arvioitiin millaiset poikkeamat terveyshaittatekijöissä aiheuttavat terveydellisiä vaikutuksia ja miten vakavia seurauksia haittatekijöillä voi olla.

Kysely laadittiin olosuhdepainotteiseksi ja oireilua kysytään vain yhdellä kysymyksellä. Kysymykset laadittiin pääasiassa strukturoiduksi ja kaksiosaisiksi kysymyksiksi, joilla voidaan selvittää sekä haittatekijässä esiintyvän poikkeaman laajuutta että voimakkuutta eli haittaavuutta tilojen käyttäjille.

4. Testausmenetelmä ja testikohteet

Jotta menetelmä voisi toimia, tulisi kyselyn tulosten perusteella lasketun lukuarvon vastata rakennuksesta tehtyjen tutkimusten tuloksia ja muita rakennuksen terveellisyyteen liittyviä havaintoja. Testattavat kohteet valittiin kahdesta perusjoukosta harkinnanvaraista otantaa käyttäen. Perusjoukkoina olivat 1) selvästi vaurioituneet koulurakennukset ja 2) koulurakennukset, joiden arvioitiin olevan vaurioitumattomia.

Testattavaksi valittiin olemassa olevan tiedon perusteella 15 kohdetta, joiden tuli täyttää seuraavat kriteerit:

1. Vaurioituneet rakennukset, 8 kpl (1A...8A)

Tähän ryhmään valittiin sellaisia rakennuksia, jotka ovat Espoon kaupungin Tilakeskusliikelaitoksen (1.1.2016 alkaen Tilapalvelut-liikelaitos) tekemän Peruskorjaushankkeiden priorisointi –listalla (päivitys 2013) ja yhteispistemäärä sisäilman ja teknisen kunnan osalta on korkeahko. Lisäksi kohteen tuli olla Tilakeskusliikelaitoksen sisäilma-asiantuntijoiden

tutkimuslistalla (syksy 2014) ja kohteissa tiedettiin olevan rakennuksesta johtuvia sisäilmaongelmia.

2. Vaurioitumattomat rakennukset, 7 kpl (1B...7B)

Tähän ryhmään valittiin sellaisia rakennuksia, jotka eivät ole Espoon kaupungin Tilakeskusliikelaitoksen tekemän Peruskorjaus-hankkeiden priorisointi -listalla (päivitys 2013).

Kohde ei myöskään saanut olla Tilakeskuksen sisäilma-asiantuntijoiden tutkimuslistalla (syksy 2014) eikä muun tiedon perusteella ollut syytä epäillä rakennuksessa olevan sisäilmaongelmia.

5. Käytännön toteutus

Kysely toteutettiin Webropol-kyselytyökalulla ja kyselyt lähetettiin työntekijöiden henkilökohtaisiin sähköposteihin. Kyselyn sai yhteensä 575 työntekijää. Kysely oli vastaajille avoinna 30.11.2014–3.2.2015 välisen ajan. Ennen vuodenvaihdetta kouluissa on varsin kiireistä ja tästä johtuen vastausaika muodostui pitkäksi. Kyselyn saaneille lähetettiin kaksi muistutusviestiä.

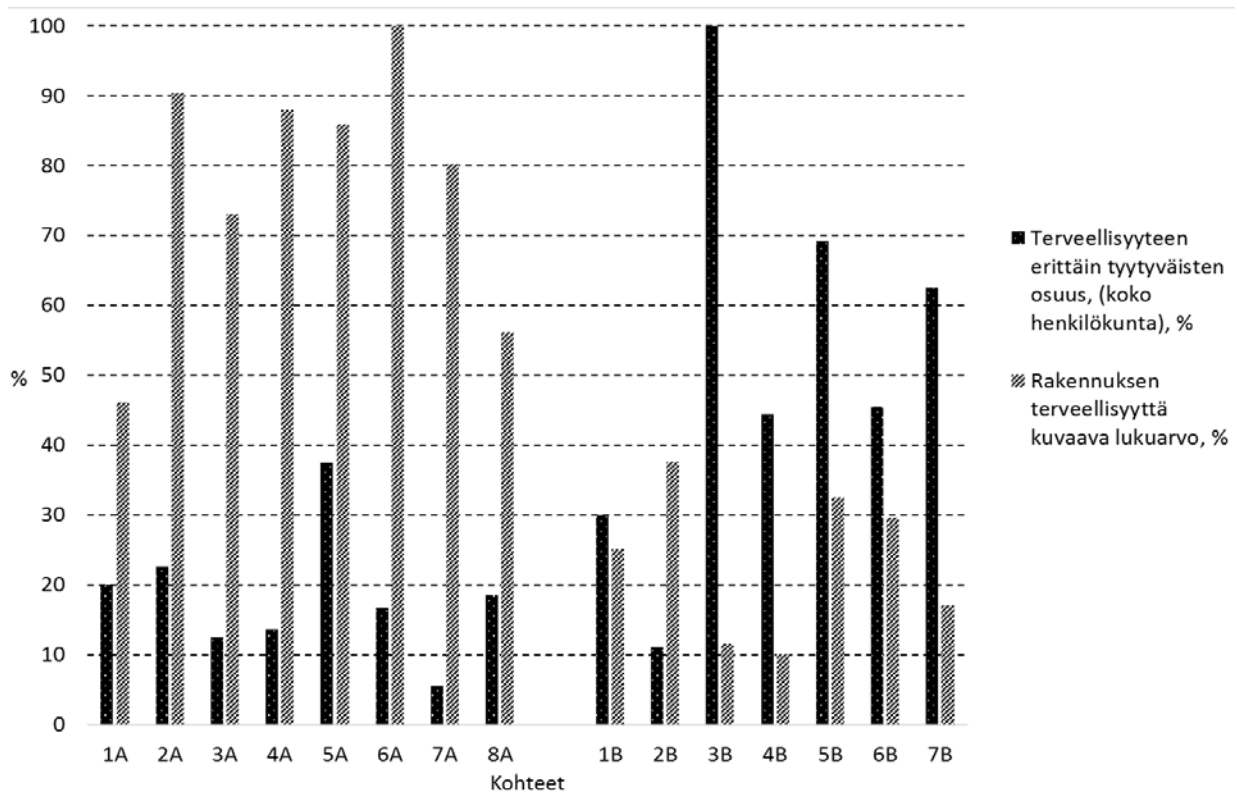
6. Laskentamenetelmä

Laskentamenetelmän tuli tuottaa rakennuskohtainen, rakennuksen terveellisyyttä kuvaava lukuarvo ja laskenta laadittiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla niin, että kyselyn tulosten Exceliin siirtämisen ja vastausten mahdollisen paikkauksen jälkeen, lukuarvon laskenta tapahtuu automaattisesti laskentakaavojen avulla. Eri häirtatekijöillä on erilainen merkitys ihmisen terveydelle ja tästä syystä vastauksia oli tarkoituksenmukaista painottaa niin, että suurimman painoarvon laskennassa saavat ne vastaukset, jotka liittyvät haitallisimpien häirtatekijöiden olemassaoloon. Lisäksi painoarvoa oli tarkoituksenmukaista antaa myös niille vastauksille, joissa vastaaja on kokenut merkittävää haittaa.

7. Tulokset

Vertailukelpoisen lukuarvon laskentaan valittiin 15 kohdetta ja kysely lähetettiin 575 työntekijälle, joista kyselyyn vastasi 201 henkilöä. Vastausaktiivisuus vaurioituneissa rakennuksissa oli 36 - 62 % ja vaurioitumattomissa 13 - 31 %. Naisten osuus vastanneista oli vaurioituneissa kohteissa 87 % ja vaurioitumattomissa 85 %. Työhön erittäin tyytyväisten osuus (kysymys 29) oli molemmissa ryhmissä samaa tasoa (vaurioituneet 73 % ja vaurioitumattomat 79 %). Sen sijaan ryhmien välillä oli selkeä ero rakennuksen terveellisyydessä (kysymys 28), turvallisuudessa (kysymys 27) ja viihtyvyydessä (kysymys 26) kokonaisuutena. Vaurioituneiden rakennusten vastaajista erittäin tyytyväisten osuus oli 18 % (terveellisyys), 42 % (turvallisuus) ja 20 % (viihtyvyys), kun vastaavat luvut vaurioitumattomissa oli 52 %, 83 % ja 55 %.

Jos tehdään olettamus, että vastaajien kokema tyytyväisyys rakennuksen terveellisyteen (kysymys 28) indikoi koko henkilökunnan tyytyväisyyttä, ja muunnetaan tulos vastaamaan koko henkilökuntaa, saadaan kuvassa 1 esitetty tulos. Kuvasta on selkeästi havaittavissa, että tyytyväisyys rakennuksen terveellisyteen on selvästi alhaisempi vaurioituneissa rakennuksissa. Kuvassa esitetty rakennuksen terveellisyyttä kuvaava lukuarvo on muunnettu prosenteiksi niin, että korkein pistemäärä vastaa sataa prosenttia ja alhaisemmat pisteet on suhteutettu tähän.



Kuva 1. Rakennuksen terveellisyyteen erittäin tyytyväisten osuus, kun tulos on muunnettu vastaamaan koko henkilökuntaa.

Taulukkoon 1 on koottu kyselyn painotetut ja kysymyskohtaiset tulokset. Kukin kysymys on saanut painotusten jälkeen tietyn pistemäärän, jonka perusteella on arvioitu, miten merkityksellinen puute on terveyden kannalta.

Taulukko 1. Kyselyn painotetut ja kysymyskohtaiset tulokset.

kohde	ilmanvaihto	lämpöolot	ilmankosteus	poikkeava haju	pistävä haju	mullan (homeen) haju	viemärinhaju	pöly tasopinnoilla	vesivuotojälkiä/pinnan kupruilua	melu	akustiikka	valaistus	oireilu	Terveellisyyttä kuvaava lukuarvo
1A	4	1	1	2	1	1	1	2	0	1	1	1	2	9071
2A	4	1	1	4	2	1	2	2	1	1	1	1	4	17760
3A	4	2	1	2	2	2	1	2	1	1	0	1	3	14361
4A	4	1	1	3	2	1	1	2	2	1	1	1	3	17291
5A	4	2	2	3	0	0	2	3	0	2	1	1	4	16882
6A	4	2	2	4	2	1	1	2	1	1	0	1	3	19650
7A	4	1	1	3	2	2	1	2	3	1	1	1	3	15756
8A	4	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	4	11020
1B	2	1	1	2	2	0	1	1	0	1	1	1	1	4938
2B	4	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0	1	2	7387
3B	2	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	2263
4B	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1985
5B	2	1	1	2	2	1	1	2	0	1	1	1	2	6381
6B	2	1	1	2	1	1	1	2	1	0	1	1	2	5815
7B	2	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	3343

Taulukossa 1 tulokset on esitetty seuraavasti:

Kysymyskohtainen pistemäärä 0	0	Haittatekijää ei esiinny
Kysymyskohtainen pistemäärä alle 500	1	Haittatekijän merkitys vähäinen
Kysymyskohtainen pistemäärä yli 500 - 1500	2	Haittatekijän merkitys lievä
Kysymyskohtainen pistemäärä yli 1500 - 2500	3	Haittatekijän merkitys kohtuullinen
Kysymyskohtainen pistemäärä yli 2500	4	Haittatekijän merkitys merkittävä

8. Soveltuvuus priorisointiin

Opinnäytetyö antoi selvän viitteen siitä, että kyselyä ja laskentamenetelmää on mahdollista käyttää kohteiden priorisointiin. Menetelmä jakoi testattavat kohteet selkeästi halutulla tavalla vaurioituneisiin ja vaurioitumattomiin. Tehdyn testin perusteella tulos oli siis varsin positiivinen ja vastaa hyvin pitkälle myös sitä käsitystä (hiljaista tietoa), mikä tekijälle on kohteista muodostunut sisäilma-asiantuntijan työssä Espoon kaupungin palveluksessa.

Vastausprosentit jäivät kuitenkin alhaisiksi. Kysely toteutettiin koulujen työntekijöiden näkökulmasta katsottuna erittäin kiireiseen aikaan, jonka johdosta on hyvinkin saatettu jättää vastaamatta. Jälkeenpäin tarkasteltuna ensimmäinen saateviesti ja muistutukset eivät olleet erityisen houkuttelevia ja selkeitä ja ovat näin voineet vaikuttaa myös vastausaktiivisuuteen.

Alhainen vastausprosentti itsessään ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tulokset olisivat epäluotettavia. Ihmisten on todettu osallistuvat mieluiten kyselyihin, jonka aihe on itselle merkityksellinen [7, 8, 9, 10]. On mahdollista, että pieni vastausprosentti kertoo siitä, että tilojen käyttäjät eivät koe tiloissa olevan ongelmia ja eivät tästä syystä kokeneet vastaamista tarpeelliseksi. Tämä saattaa myös selittää sitä, että vastausprosentit olivat vaurioitumattomissa kohteissa alhaisemmat kuin vaurioituneissa. Kysely on joka tapauksessa laadittu niin, että olennaista on se, että ne työntekijät vastaavat, jotka kokevat tiloissa olevan sisäongelmia.

Se, mittaako kysely sitä mitä sen halutaan mittaavan, riippuu laadituista kysymyksistä ja kirjallisuudessa painotettiin vahvasti sitä, että tämän arvioiminen tulee tehdä tarkastelemalla laadittuja kysymyksiä. Tässä työssä kysymysten laatimiseen perehdyttiin syvällisesti ja pyrittiin huomiomaan kirjallisuudessa esitettyjä näkökohtia mahdollisimman hyvin. Rakennuksen terveellisyys -käsitteen purkamisen kysymyksiksi tehtiin huolella perehtyen ensin syvällisesti niihin tekijöihin, jotka voivat aiheuttaa ihmisen terveydelle haittaa. Menetelmä huomioi sekä ongelmien laajuutta että vakavuutta. Ajatuksena on se, että mitä enemmän käyttäjä tekee erilaisia poikkeavia havaintoja tiloissa, sitä todennäköisemmin rakennuksessa on terveysvaikutuksia aiheuttavia puutteita. Koska haittatekijöillä on erilainen merkitys ihmisen terveydelle, on haittatekijöiden painotuksilla kyetty huomioimaan poikkeamien vakavuutta.

Vastaajia pyydettiin antamaan kyselystä palautetta ja useat vastaajat olivat pitäneet kyselyä selkeänä ja siihen oli ollut helppo vastata. Tämä viittaa siihen, että kysymysten ja vastausvaihtoehtojen ymmärtämisessä ei ole ollut ongelmia. Nämä tekijät lisäävät kyselyn reliabiliteettia.

Tuloksiin voi aiheutua virhettä eri syistä ja kokonaan virhettä on mahdotonta eliminoida pois. Koska menetelmällä on tarkoitus luokitella rakennuksia, eivät kaikki virheet ole niin merkityksellisiä. Voidaan olettaa, että todennäköisesti kaikissa kohteissa esiintyy samanlaista virhettä ja jokseenkin samansuuruisena. Esimerkiksi vastaajat vastaavat keskimäärin yhtä

rehellisesti, kysymykset ymmärretään keskimäärin yhtä hyvin, vastauksia kirjataan keskimäärin yhtä usein väärin tai vastaajissa on keskimäärin yhtä paljon astmaatikkoja. Tätä voidaan perustella osittain sillä, että vastaajajoukko on kouluissa samantyyppinen, ja vastaajien voidaan arvioida olevan pääasiallisesti esimerkiksi samassa sosioekonomisessa asemassa.

9. Yhteenveto

Testattavana menetelmänä oli henkilökunnalle suunnattu kysely ja laskentamenetelmä, joka tuottaa rakennuksen terveellisyyttä kuvaavan lukuarvon. Kehitettyä menetelmää testattiin 15 koulussa, joista kahdeksan oli vaurioituneita ja seitsemän vaurioitumattomia. Kyselyn kysymykset liittyivät yleisesti hyväksytyihin terveyshaittekeijöihin (ilmanvaihtuvuus, lämpötila, veto, ilmankosteus, rakennekosteus, melu, akustiikka, valaistus, mikrobit, haihtuvat orgaaniset ja epäorgaaniset yhdisteet, viemärikaasut, pöly). Kyselyyn vastasi 201 työntekijää 575 työntekijästä. Kysely toteutettiin Webropol-kyselytyökalulla ja lukuarvon laskenta Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Laskennassa vastauksia painotettiin sen mukaan, miten vakavasta terveyshaittekeijästä oli kyse ja kuinka moni vastaaja koki siitä olevan haittaa. Tulosten perusteella kehitetty menetelmä erotteli vaurioituneet rakennukset vaurioituneista. Lisäksi menetelmälle asetetut ehdot nopeudesta ja edullisuudesta toteutuivat.

Teoreettiset tarkastelun perusteella menetelmän voidaan arvioida soveltuvan kohteisiin, joissa kullakin työntekijällä on oma työtila ja tilanteisiin, joissa on tarve saada nopeasti ja edullisesti kohtuullisen hyvää käsitys siitä, mitkä rakennukset ovat todennäköisesti sisäilmaongelmaisimmat.

Lähdeluettelo

- [1] Raw, G.J. (2001) Assessing occupant reaction to indoor air quality. Teoksessa Spengler, D. & Samet, J. & McCarthy, J. (toim.). Indoor air quality handbook. New Jersey: McGraw-Hill, 53.1 – 53.30.
- [2] Seuri, M. & Palomäki, E. (2000) Haasteellinen sisäilma. Riskianalyysi sisäilmaongelmissa. Rakennustieto Oy: Tampere.
- [3] WHO. (2007) guidelines for indoor air quality: dampness and mould.
- [4] European Commission. (2014) Guidelines for healthy environments within European schools.
- [5] The International Society of Indoor Air Quality and Climate. (2004) ISIAQ-CIB Task Group TG 42. Performance criteria of buildings for health and comfort.
- [6] Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1.
- [7] Heerwegh, D. (2005) Web surveys. Explaining and reducing unit nonresponse, item nonresponse and partial nonresponse. Väitöstutkimus. Leuven: Katholieke universiteit Leuven
- [8] Bethlehem, J. & Biffignandi, S. (2012) Handbook of web surveys. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Nikula, J. (2010) Tiedonkeruu- ja painotusmenetelmien vaikutukset tutkimusaineiston laatuun ja estimaatteihin. EU-rikosuhritutkimuksen aineistojen tarkastelu vastauskadon näkökulmasta. Pro-gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto
- [10] Albaum, G. & Smith, S.M. 2012. Why people agree to participate in surveys. Teoksessa Gide-on, L. (toim.). Handbook of survey methodology for the social science. New York: Springer, 179 - 193.

Työpaikkatilojen jatkuvatoiminen radonmittaus

Pasi Arvela
Tampereen ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa on tarkasteltu 16 vuoden aikana pääosin Pirkanmaan alueella tehtyjen työpaikan jatkuvatoimisten radonmittausten tuloksia. Jatkuvatoimisessa mittauksessa radonpitoisuus rekisteröidään mitattavassa kohteessa tunneittain seitsemän vuorokauden ajan.

Kohteiksi on valittu sellaisia kiinteistöjä, joissa on koneellinen tulo- ja poiston sisältävä ilmanvaihto, joka on työajan mukaan ajastettu. Tämän lisäksi kohteissa keskimääräinen radonpitoisuus on ylittänyt toimenpidearvon seitsemän vuorokauden mittauksen aikana. Työaikainen radonpitoisuus on määritetty tuloksista tilaajan ilmoittaman työajan mukaan.

Tässä seurannassa on laskettu niiden kohteiden osuudet, joissa radonpitoisuus työaikana pysyy toimenpiderajan alapuolella verrattuna kaikkiin mittauskohteisiin, jotka on valittu tarkasteluun.

Tämän seurannan perusteella niiden kohteiden osuus, joissa radonpitoisuus ajastetun ilmanvaihdon avulla pysyy toimenpidearvon alapuolella, on merkittävästi tarkastelujaksolla kasvanut.

1. Johdanto

Tässä artikkelissa tarkastellaan työpaikoilla suoritettujen jatkuvatoimisten radonmittausten tuloksia sellaisissa kohteissa, joissa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Tavoitteena on ollut selvittää niiden kohteiden osuus, jossa ilmanvaihto toimii radonpitoisuuden kannalta toivotulla tavalla. Aluksi tarkastellaan lyhyesti radonin ominaisuuksia, haittoja, mittaamista ja nykyisiä ja tulevia viranomaisrajoja.

2. Radonin esiintyminen ja sen aiheuttamat haitat

Radon on asuntojen ja työpaikkojen sisäilmassa esiintyvä näkymätön ja hajuton jalokaasu. Suomessa noin 300 henkeä saa vuosittain keuhkosityövän radonin myötävaikutuksella. Radonin ei ole todettu aiheuttavan muita terveyshaittoja [1]. Radon on siten merkittävin ionisoivan säteilyn haittojen tuottaja Suomessa.

Suomessa radonpitoisuudet ovat korkeampia, kuin useimmissa muissa maissa. Syyt korkeisiin radonpitoisuuksiin löytyvät geologiasta, rakennustekniikasta ja ilmastosta. Radonin haitoista, kulkeutumistavoista ja reiteistä löytyy monipuolisesti tietoa esimerkiksi Säteilyturvakeskuksen verkkosivuilta (stuk.fi) ja lähteestä [2].

Keskimääräinen radonpitoisuus suomalaisissa asunnoissa on n. 100 becquereliä kuutiometrissä (Bq/m^3) [1]. Se vastaa yli puolesta keskimääräisestä säteilyannoksesta. Kaikkein tehokkaimmin vähennettäisiin suomalaisten keskimääräistä säteilyannosta pienentämällä huoneilman radonpitoisuutta.

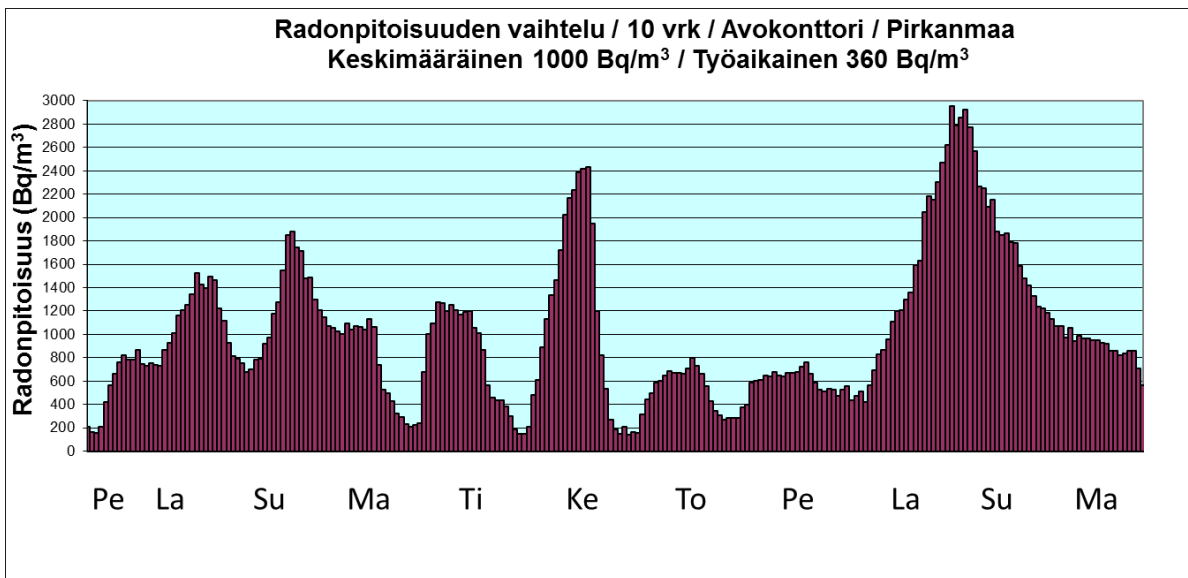
2.1 Toimenpiderajoista

Säteilyasetuksessa 27 § [3] on määritelty toimenpideraja työpaikkojen radonpitoisuudelle, joka esim. säännölliselle työlle on 400 Bq/m^3 . Säteilylain uudistus on käynnissä ja sen myötä uudet matalammat raja-arvot tulevat voimaan lähivuosina. Todennäköisesti edellä mainittu raja (viitearvo) tulee olemaan 300 Bq/m^3 [4].

2.2 Radonpitoisuuden jatkuvatoiminen mittaus

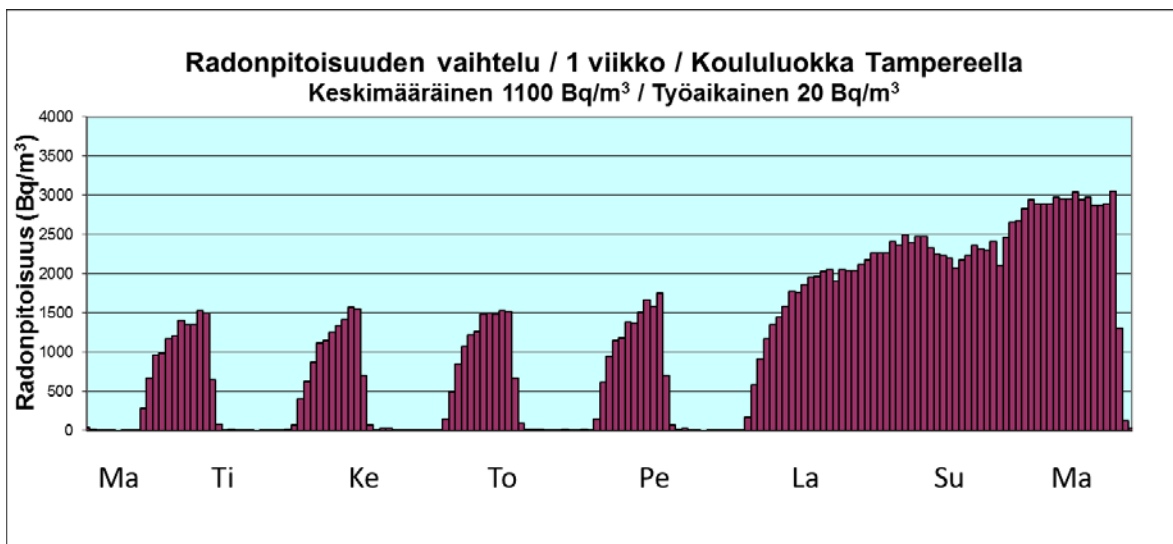
Tampereen ammattikorkeakoulu on tehnyt radonpitoisuuden mittauksia työpaikoilla pääosin Pirkanmaan alueella yli 20 vuotta. Mittauksia on tehty jatkuvatoimisella mittalaitteella, jolla kohteen radonpitoisuus rekisteröidään tunneittain viikon mittausjaksolla. Mittalaitteena on ollut Alphaguard PQ2000 Pro ja aiempina vuosina myös Pylon AB-5. Mittalaitteet on hyväksyttävä ja kalibroitava määräajoin Säteilyturvakeskuksella.

Kuvissa 1 ja 2 on esimerkkejä radonpitoisuuden mittaustuloksista parissa kohteessa. Radonpitoisuus vaihtelee monesta tekijästä johtuen: Vuodenaika, sisä- ja ulkoilman lämpötilaerot sekä näissä kohteissa ilmanvaihdon toiminta vaikuttavat merkittävästi [4]. Kuvassa 1 työaikainen pitoisuus jää niukasti alle toimenpiderajan, kun viikonvaihteesta ei työskennellä.



Kuva 1. Esimerkki kohteesta, jossa on suuri vaihtelu radonpitoisuudessa mm. sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta, tuulesta ja ilmanvaihdon ajoituksesta riippuen.

Kuvassa 2 näkyy miten radonpitoisuus kasvaa viikonlopun aikana merkittävästi ilmanvaihdon ollessa pois kytkettynä. Useissa kohteissa ilmanvaihto on mahdollista kytkeä manuaalisesti määräajaksi myös viikonvaihteena. Mainittakoon myös, että tähän valituissa kohteissa radonpitoisuuden vaihtelu on keskimääräistä Tampereen seudun kohdetta suurempaa.



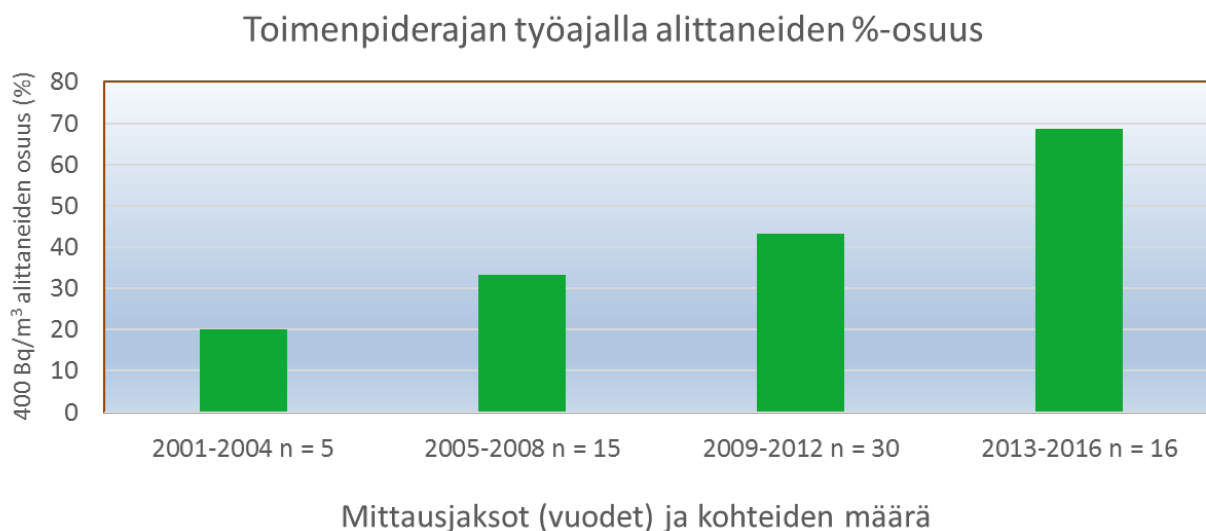
Kuva 2. Esimerkki kohteesta, jossa radonpitoisuus riippuu pääosin ilmanvaihdon ajoituksesta.

2.3 Tuloksia vuosilta 2001–2016

Vuosien varrella on tekijälle syntynyt tuntuma, että yhä useammin kohteen radonhallintaan riittää luotettavasti suoritettu mittaus sen osoittamiseksi, että työaikainen pitoisuus ei ylitä toimenpiderajaa. Tätä varten on kerätty mahdollisimman vertailukelpoisia mittaustuloksia 16 vuoden tarkastelujaksolla graafiseen esitykseen hyvän kehityksen osoittamiseksi.

Tarkasteluun otetut kohteet ovat sellaisia työpaikkoja tai julkisia tiloja, joissa koneellisen tulon ja poisto sisältävä ilmanvaihto on ajastettu työajan mukaan ja kohteessa on mittauksella havaittu toimenpiderajan ylittävä keskimääräinen radonpitoisuus.

Kuvassa 3 on esitetty vuosilta 2001 - 2016 yhteensä 66 kohteen mittaustulokset neljän vuoden tarkastelujaksoin. Pylväs osoittaa niiden tapausten osuuden, jossa toimenpideraja 400 Bq /m³ on alittunut työajalla, vaikka keskimääräinen pitoisuus on ollut rajaa korkeampi.



Kuva 3. Niiden kohteiden osuus kaikista mitatuista, joissa radonpitoisuus alittaa toimenpiderajan 400 Bq/m³ työaikana, vaikka keskimääräinen pitoisuus ylittää mainitun rajan. (Vuodet 2001-2016 /korkeampi pylväs parempi tulos).

Tuloksista havaitaan, että radonpitoisuuden kannalta onnistuneesti toimiva ilmavaihto näyttää olevan huomattavasti todennäköisempi vuonna 2016 kuin 2000-luvun alkupuolella.

Tarkastelujaksolla on tehty yhteensä n. 200 vähintään 7 vrk mittausta ja vertailusta on poistettu muilla ilmanvaihtoratkaisuilla tai muuten ei vertailukelpoisina n. 2/3 mittauksista. Tarkasteluun jääneet kohteet on niputettu 4 vuoden jaksoihin, jotta tapausten määrä on saatu kohtuulliseksi. Kohteet ovat kouluja, päiväkoteja ja tavanomaisia työpaikkoja Pirkanmaan alueelta.

Kohteiden ilmanvaihdon toimintaperiaate ja ajastustiedot on saatu kiinteistöjen edustajilta tai mittauksen tilaajilta. Ilmanvaihtoon ei ole kohdistunut mittaustoimenpiteitä, kuten sisä- ja ulkotilan paine-eron mittausta, kuin aivan muutamassa kohteessa.

2.4 Johtopäätelmiä

Tarkastelujaksolla mahdollisina syinä hyvään kehitykseen voidaan arvioida olevan koneellisen tulon ja poiston järjestelmien kehittyminen ja mm. paine-eromittausten käyttö ilmanvaihdon säädössä. Radonin pääsyä huoneilmaan edistää merkittävästi epäedullinen paine-ero sisäilman ja rakenteiden ulkopuolisen maaperän välillä.

Tekijällä ei ole ollut mahdollisuuksia selvittää yksityiskohtaisemmin kohteiden ilmanvaihtojärjestelmien toimintaa ja niissä tapahtunutta kehitystä. Tulos sisältää kuitenkin selkeän viitteen kiinteistöjen ilmanvaihtojärjestelmien hyvästä kehityksestä tarkastelujaksolla. Tässä lienee edellytyksiä myös aiheen tarkempaan tutkimukseen.

Vaikka radonia mitattaessa on kyse äärimmäisen pienistä kaasumääristä, voitaisiin graafisia mittaustuloksia ehkä käyttää myös viitteinä muiden maaperän tai rakenteiden kaasumaisten aineiden pääsystä sisäilmaan.

3. Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitettiin tuloksia Tampereen ammattikorkeakoulun suorittamista jatkuvatoimisista radonmittauksista työpaikoilla. Tarkastelu osoittaa hyvää kehitystä. Siten niiden kohteiden suhteellinen osuus, joissa koneellisen tulon ja poiston toiminta alentaa radonpitoisuuden toimenpiderajan alapuolelle työaikana, on merkittävästi lisääntynyt 16 vuoden seuranta-aikana.

Lähdeluettelo

- [1] Sisäilman radon. Säteilyturvakeskus. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014120249922>
- [2] Weltner A, Arvela H, Turtiainen T, Mäkeläinen I, Valmari T. 2003, Radon sisäilmassa. STUK (Säteily- ja ydinturvallisuus –kirjasarja)
- [3] Säteilyasetus 20.12.1991/1512. Ajantasainen lainsäädäntö: www.finlex.fi
- [4] Hallituksen esitys eduskunnalle säteilylaiksi ja eräiksi siihen liittyviksi laiksi. Versio 18.7.2017 stm.fi/documents

B7. Ääneneristys ja meluntorjunta

Ilmääneneristävyyden mittauksia koskeva round robin -testi

Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Round robin -testillä tarkoitetaan laboratorioiden välistä testiä, joka suoritetaan useaan otteeseen toisistaan riippumatta eri operaattoreiden toimesta. Ilmääneneristävyyden round robin -testien tarkoituksena on yleensä selvittää mittausten epävarmuutta. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n akustiikkatoimikunta järjesti syksyllä 2016 ilmääneneristävyyden round robin -testin. Testissä kahden tilan välistä ilmääneneristävyyttä mittasi 14 organisaatiota, joista tulokset saatiin 19 mittausryhmältä. Testissä ilmääneneristävyyden mittalukuina olivat 1/3-oktaavikaistoittain mitatut ilmääneneristävyys R' ja äänitasoero D_{nT} ja näiden arvoista määritetyt ilmääneneristysluku R'_w sekä äänitasoeroluku $D_{nT,w}$. Lisäksi laskettiin standardin ISO 717-1 mukaisesti spektripainotusermit. Testissä määritettyjen ilmääneneristyslukujen R'_w keskiarvo oli 59,9 dB ja keskihajonta 1,2 dB. Äänitasoerolukujen $D_{nT,w}$ keskiarvo oli 59,0 dB ja keskihajonta 1,2 dB. Round robin -testin perusteella syyt mittauserävarmuudelle olivat äänikentästä johtuva äänenpainetasojen hajonta pienillä taajuuksilla, erot mittausryhmien määrittelemissä huoneiden tilavuuksissa ja muista selvästi poikkeavat mittaustulokset.

1. Johdanto

Round robin -testillä tarkoitetaan laboratorioiden välistä testiä, joka suoritetaan useaan otteeseen toisistaan riippumatta eri operaattoreiden toimesta. Näin testiin osallistuvat pääsevät vertaamaan mittaustuloksiaan muiden toimijoiden saamiin tuloksiin. Ilmääneneristävyyden round robin -testien tarkoituksena on yleensä selvittää mittausten epävarmuutta. Kun toimijat mittaavat samojen tilojen välillä, saadaan selville mm. kalustosta, mittaustavasta ja mittaajasta aiheutuvat mittaustulosten vaihtelut.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n akustiikkatoimikunta järjesti syksyllä 2016 ilmääneneristävyyden round robin -testin. Testin tarkoituksena oli tarjota Suomessa ääneneneristävyyden kenttämittauksia tekeville toimijoille mahdollisuus vertailla mittaustuloksiaan ja varmistaa niiden oikeellisuus. Testissä kahden tilan välistä ilmääneneristävyyttä mittasi 14 organisaatiota, joista mittaustulokset saatiin 19 mittausryhmältä. Mittauksiin osallistuneet organisaatiot olivat oppilaitoksia, tutkimuslaitoksia ja alan suunnitteluyrityksiä. Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratorion laatima testin raportti on kokonaisuudessaan luettavissa RIL ry:n verkkosivustolla [1].

2. Mittaukset

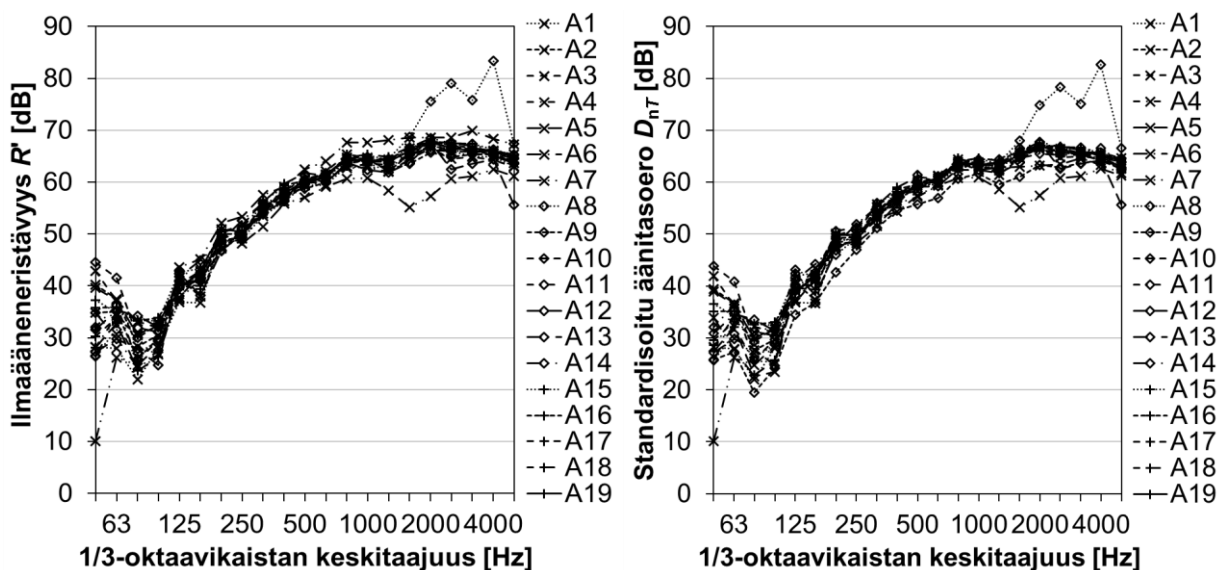
RIL ry:n akustiikkatoimikunta lähetti 18.8.2016 akustisia mittauksia tekeville toimijoille kutsun ilmääneneristävyyden round robin -testiin. Testiin ilmoittautuneille lähetettiin 29.9.2016 infokirje, jossa mittauksista kerrottiin tarkemmin. Mittaukset tehtiin betonirakenteisessa toimistorakennuksessa kahden päällekkäisen tilan välillä pystysuuntaan. Mittaukset tuli tehdä voimassa olevien standardien ISO 16283-1 ja ISO 717-1 mukaan käyttäen toimijan omia mittaustaitteita. Kunkin toimijan tuli tehdä mittaukset itsenäisesti ja määrittellä standardien

mitattaviksi edellyttämät huoneiden dimensiot ja mittausolosuhteet itse.

Mittaajat määrittivät tuloksistaan 1/3-oktaavikaistaiset ilmaääneneristävyydet R' ja standardisoidut äänitasoerot D_{nT} . Lisäksi he laskivat näistä vastaavat mittaluvut eli ilmaääneneristysluvun R'_w ja standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ sekä spektripainotusermit C , C_{tr} , $C_{50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{100-5000}$, $C_{tr,50-3150}$, $C_{tr,50-5000}$ ja $C_{tr,100-5000}$. Mittaajat kirjasivat saamansa tulokset ennalta määritettyyn tiedostoon, joka lähetettiin täytettynä testin järjestäjälle RIL ry:n toimistoon, jossa kunkin toimijan lähettämät mittaustulokset anonymisoitiin. Mittausryhmistä käytettiin merkintöjä A1...A19.

3. Tulokset

Kaikkien mittausryhmien määrittämät 1/3-oktaavikaistaiset ilmaääneneristävyydet R' ja äänitasoerot D_{nT} on esitetty kuvassa 1. Tulosten perusteella erottuu kaksi muista poikkeavaa mittausryhmää: A7 ja A8. Näiden ryhmien tulokset olivat suurilla, yli 1250 Hz taajuuksilla selvästi muista poikkeavat. Lisäksi mittausryhmän A7 tulos oli huomattavasti muita pienempi 50 Hz taajuuskaistalla. Ilmaääneneristävyyden R' taajuuskaistainen keskihajonta oli 1,1–7,7 dB kaikkien tulosten osalta ja 0,8–5,7 dB, kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon. Standardisoidun äänitasoeron D_{nT} keskihajonta oli 1,0–7,6 dB taajuuskaistoittain kaikkien tulosten osalta ja 0,8–5,8 dB ilman poikkeavia tuloksia. Vastaanottohuoneen tilavuudeksi ryhmät määrittivät 48–61,8 m³ [1].



Kuva 1. Ilmaääneneristävyys R' (vas.) ja äänitasoero D_{nT} (oik.) 1/3-oktaavikaistoittain.

Ilmaääneneristyslukujen R'_w sekä R'_w :n ja spektripainotusermien summan keskiarvot, minimi- ja maksimiarvot sekä keskihajonnat on esitetty taulukossa 1 ja standardisoitujen äänitasoerolukujen $D_{nT,w}$ sekä $D_{nT,w}$:n ja spektripainotusermien summan osalta taulukossa 2. Tulokset on esitetty, kun kaikkien mittausryhmien tulokset on otettu huomioon ja ilman ryhmien A7 ja A8 muista poikkeavia tuloksia.

Määritettyjen ilmaääneneristyslukujen R'_w keskiarvo oli 59,9 dB ja keskihajonta 1,2 dB kaikkien mittaustulosten osalta ja 60,0 dB ja 1,1 dB, kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon. Äänitasoerolukujen $D_{nT,w}$ keskiarvo oli 59,0 dB kaikki tulokset huomioon otettuna ja 59,2 dB ilman muista poikkeavia tuloksia. Keskihajonta molemmissa tapauksissa oli 1,2 dB. Taulukoista

nähdään, että mittalukujen $R'_w + C_{tr,50-3150}$ ja $R'_w + C_{tr,50-5000}$ hajonta oli noin 1 dB pienempi ja mittalukujen $D_{nT,w} + C_{tr,50-3150}$ ja $D_{nT,w} + C_{tr,50-5000}$ hajonta 0,8 dB pienempi, kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon. Muiden mittalukujen osalta erot olivat pienemmät.

Taulukko 1. Mittalukujen R'_w ja spektripainotustermien keskiarvo, minimi, maksimi ja keskihajonta. Soluissa vasemmalla kaikki tulokset mukana, oikealla ilman poikkeavia tuloksia.

Mittaluku	Keskiarvo [dB]	Minimi [dB]	Maksimi [dB]	Keskihajonta [dB]
R'_w	59,9 / 60,0	57 / 58	62 / 62	1,2 / 1,1
$R'_w + C$	55,9 / 56,0	52 / 52	58 / 58	1,8 / 1,7
$R'_w + C_{tr}$	48,8 / 48,9	44 / 44	51 / 51	2,1 / 2,2
$R'_w + C_{50-3150}$	53,4 / 53,5	44 / 44	58 / 58	3,8 / 3,9
$R'_w + C_{50-5000}$	54,5 / 54,8	44 / 44	58 / 58	3,6 / 3,5
$R'_w + C_{100-5000}$	56,1 / 56,2	49 / 49	59 / 59	2,5 / 2,5
$R'_w + C_{tr,50-3150}$	46,1 / 47,0	34 / 41	54 / 54	4,6 / 3,6
$R'_w + C_{tr,50-5000}$	45,6 / 46,4	34 / 41	55 / 55	4,4 / 3,5
$R'_w + C_{tr,100-5000}$	49,0 / 49,1	43 / 43	56 / 56	3,0 / 3,1

Taulukko 2. Mittalukujen $D_{nT,w}$ ja spektripainotustermien keskiarvot, minimi, maksimit ja keskihajonta. Soluissa vasemmalla kaikki tulokset mukana, oikealla ilman poikkeavia tuloksia.

Mittaluku	Keskiarvo [dB]	Minimi [dB]	Maksimi [dB]	Keskihajonta [dB]
$D_{nT,w}$	59,0 / 59,2	56 / 56	61 / 61	1,2 / 1,2
$D_{nT,w} + C$	54,9 / 55,1	51 / 51	57 / 57	1,9 / 2,0
$D_{nT,w} + C_{tr}$	47,9 / 48,0	43 / 43	51 / 51	2,5 / 2,6
$D_{nT,w} + C_{50-3150}$	53,1 / 53,4	45 / 45	57 / 57	3,4 / 3,5
$D_{nT,w} + C_{50-5000}$	54,3 / 54,7	49 / 49	57 / 57	2,8 / 2,6
$D_{nT,w} + C_{100-5000}$	55,0 / 55,1	42 / 42	58 / 58	3,8 / 4,1
$D_{nT,w} + C_{tr,50-3150}$	44,6 / 45,5	34 / 38	53 / 53	4,5 / 3,7
$D_{nT,w} + C_{tr,50-5000}$	44,0 / 44,8	34 / 38	48 / 48	4,0 / 3,2
$D_{nT,w} + C_{tr,100-5000}$	48,4 / 48,6	43 / 43	54 / 54	2,8 / 2,9

4. Tulosten tarkastelu

4.1 Mittaluvun määritelmän vaikutus

Mittalukujen R'_w ja $D_{nT,w}$ keskihajonta oli suunnilleen sama, noin 1 dB. Äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ ja spektripainotustermien $C_{50-3150}$, $C_{50-5000}$, $C_{tr,50-3150}$, $C_{tr,50-5000}$ ja $C_{tr,100-5000}$ summan keskihajonta oli pienempi kuin ilmaääneneristysluvun R'_w ja vastaavien spektripainotustermien summan hajonta. Tulosten perusteella mittalukujen keskihajonta kasvaa noin 1–2 dB, kun taajuusalue 50–100 Hz otetaan huomioon. Tämä voidaan nähdä sekä R'_w :n että $D_{nT,w}$:n osalta (taulukot 1 ja 2). Syy tälle on todennäköisesti äänikentästä johtuva äänenpainetasojen hajonta ts. äänikentän epädiffuusisuus pienillä taajuuksilla [2–3]. Kun spektripainotustermien avulla otetaan huomioon 100–5000 Hz taajuusalue, kasvoi keskihajonta noin 1–2 dB mittaluvusta riippuen tavanomaisen taajuusalueen 100–3150 Hz perusteella määritettäviin mittalukuihin verrattuna. Tuoreiden tutkimusten mukaan taajuusalueen laajentamisesta 3150–5000 Hz alueelle ei ole havaittu olevan hyötyä, koska mittalukujen arvo ei merkittävästi muutu taajuusaluetta laajennettaessa eikä taajuusalueen laajentaminen suuremmille taajuuksille paranna rakennuksessa huoneesta toiseen välittyvän asumismelun äänitason ja mittalukujen välistä korrelaatiota [4–5].

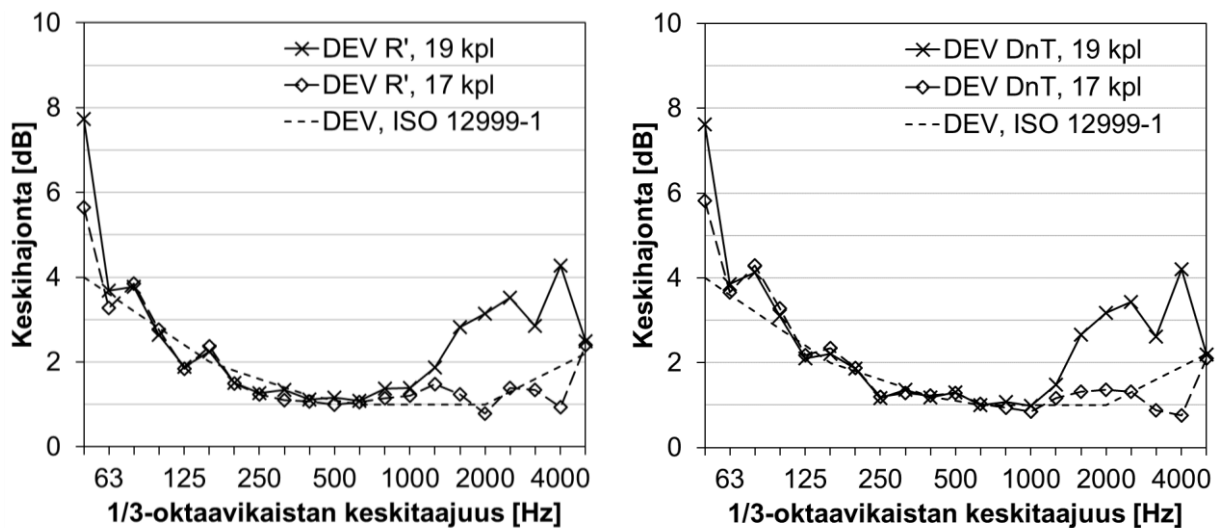
4.2 Tilavuuden vaikutus

Mittausryhmät voidaan jakaa määrittämiensä vastaanottohuoneen tilavuuksien perusteella kahteen ryhmään: siihen, joka määrittä tilavuudeksi noin 50 m³ ja ryhmään, joka määrittä

tilavuudeksi noin 60 m^3 . Jälkimmäisen osuus oli 6 mittausryhmää. Mitattavissa tiloissa oli ääntä absorboiva alakatto, ja suurin osa ryhmistä oli tulkinnut mittausstandardia siten, että alakaton yläpuolista osuutta huoneen tilavuudesta ei sisällytetä tilavuuteen. Tätä puoltaisi se, että alakaton yläpuolella tilan äänikenttä on erilainen kuin sen alapuolella, ja standardinmukaisen menetelmän oletus tilaan syntyvästä diffuusista äänikentästä. Alakaton yläpuolella ei myöskään voida mitata äänenpainetasoja niiden mittaamista koskevien sääntöjen johdosta eikä alakaton päälle yleensä edes ole mahdollista mennä mittaamaan. Lisäksi käytännössä ei ole useinkaan mahdollista mitata alakaton yläpuolista tilavuutta, esimerkiksi silloin, kun huone on hyvin korkea.

4.3 Mittausten epävarmuus

Mittaustulosten keskinäisen epävarmuuden arviointiin voidaan käyttää standardin ISO 12999-1 [6] mukaan mittausten keskihajontaa. Koska kaikki mittausryhmät tekivät mittauksensa samassa sijainnissa omilla laitteillaan, testi vastaa standardin tilannetta B (situation B). Kuvassa 2 on esitetty ilmajääneneristävyyden R' ja standardisoidun äänitasoeron D_{nT} keskihajonta kaikkien mittausten osalta (19 kpl) ja kun muista poikkeavat tulokset on poistettu (17 kpl) sekä standardissa esitetty tyypillinen keskihajonta kyseisessä tilanteessa. Taulukossa 3 on esitetty mittalukujen keskihajonnat molemmissa tilanteissa ja standardissa mittaluvuille esitetyt keskihajonnat tilanteessa B. Kuvasta 2 nähdään, että mittausten keskihajonta ylitti standardissa ISO 12999-1 esitetyn hajonnan kaikkien mittausten osalta ja myös, kun muista poikkeavat tulokset oli poistettu. Kun kaikki mittaustulokset olivat mukana tarkastelussa, ylitys oli suurimmillaan pienillä ja suurilla taajuuksilla. Kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon, ylitykset olivat suurimmillaan pienillä taajuuksilla erityisesti 50 ja 80 Hz taajuuskaistoilla. Taulukon 3 tuloksista nähdään, että kaikkien mittalukujen keskihajonta oli suurempi kuin standardissa ISO 12999-1 esitetyt mittalukujen hajonnat.



Kuva 2. Ilmajääneneristävyyden R' ja äänitasoeron D_{nT} keskihajonnat (DEV) kaikkien tulosten osalta (19 kpl) ja ilman muista poikkeavia tuloksia (17 kpl). Standardissa ISO 12999-1 esitetty keskihajonta on kuvassa katkoviivalla.

Taulukko 3. Mittalukujen keskihajonnat kaikkien tulosten perusteella ja kun muista poikkeavia tuloksia ei otettu huomioon sekä standardissa ISO 12999-1 esitetyt mittalukujen keskihajonnat.

Mittaluku	Keskihajonta [dB] kaikki tulokset	Keskihajonta [dB] ei poikkeavia tuloksia	Keskihajonta [dB] ISO 12999-1 mukaan
R'_w	1,2	1,1	0,9
$R'_w + C$	1,8	1,7	0,9
$R'_w + C_{tr}$	2,1	2,2	1,1
$R'_w + C_{50-3150}$	3,8	3,9	1,0
$R'_w + C_{50-5000}$	3,6	3,5	1,1
$R'_w + C_{100-5000}$	2,5	2,5	1,1
$R'_w + C_{tr,50-3150}$	4,6	3,6	1,3
$R'_w + C_{tr,50-5000}$	4,4	3,5	1,0
$R'_w + C_{tr,100-5000}$	3,0	3,1	1,1
$D_{nT,w}$	1,2	1,2	0,9
$D_{nT,w} + C$	1,9	2,0	0,9
$D_{nT,w} + C_{tr}$	2,5	2,6	1,1
$D_{nT,w} + C_{50-3150}$	3,4	3,5	1,0
$D_{nT,w} + C_{50-5000}$	2,8	2,6	1,1
$D_{nT,w} + C_{100-5000}$	3,8	4,1	1,1
$D_{nT,w} + C_{tr,50-3150}$	4,5	3,7	1,3
$D_{nT,w} + C_{tr,50-5000}$	4,0	3,2	1,0
$D_{nT,w} + C_{tr,100-5000}$	2,8	2,9	1,1

4.4 Muista poikkeavat tulokset

Mittausryhmien A7 ja A8 tulokset poikkesivat muista tuloksista etenkin suurilla, yli 1250 Hz taajuuksilla. Lisäksi mittausryhmän A7 tulokset olivat muita pienemmät erityisesti 50 Hz taajuuskaistalla. Mittausryhmän A7 ilmaääneneristävyuden R' ja standardisoidun äänitasoeron D_{nT} tulokset suurilla taajuuksilla olivat pienet verrattuna muihin mittausryhmiin. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, ettei ryhmän A7 mittauksissa käyttämän kaiuttimen ääniteho riitä, kun tilojen välinen ääneneristävyys kasvaa suureksi. Pienillä taajuuksilla erot voivat johtua äänikentän epädiffuusisuuden lisäksi mahdollisesti kaiuttimen äänitehon puutteesta. Mittausryhmän A8 tulokset suurilla taajuuksilla olivat taas suuremmat kuin muilla mittausryhmillä. Tämä voi viitata mittausten aikana tapahtuneeseen ongelmaan, mutta sen selvittäminen käytettävissä olleiden tulosten perusteella ei jälkeenpäin ole mahdollista.

5. Yhteenveto

Round robin -testissä määritettyjen ilmaääneneristyslukujen R'_w keskiarvo oli 59,9 dB ja standardisoitujen äänitasoerolukujen $D_{nT,w}$ keskiarvo 59,0 dB. Molempien mittalukujen keskihajonta oli 1,2 dB. Ilmaääneneristävyuden R' taajuuskaistainen keskihajonta oli 1,1–7,7 dB ja standardisoidun äänitasoeron D_{nT} keskihajonta 1,0–7,6 dB. Standardissa ISO 12999-1 esitettyihin keskihajontoihin verrattuna taajuuskaistaisten tulosten hajonnat olivat pääosin suuremmat, erityisesti alle 100 Hz ja yli 1000 Hz taajuuksilla. Alle 100 Hz taajuusalueella hajonta oli suurinta. Keskihajonnat olivat pienemmät, kun muista poikkeavia mittaustuloksia ei otettu huomioon. Mittalukujen keskihajonnat olivat kaikilta osin standardissa esitettyjä hajontoja suuremmat. Mittalukujen R'_w ja $D_{nT,w}$ keskihajonnat olivat pienimmät. Tulosten perusteella hajonta kasvoi, kun otettiin huomioon tavanomaista taajuusaluetta 100–3150 Hz laajempi taajuusalue. Tämä voitiin havaita sekä taajuuskaistaisista mittaustuloksista että mittaluvuista. Tulos ei puolla mitattavan taajuusalueen kasvattamista tavanomaisesta taajuusalueesta.

Round robin -testin perusteella syyt mittausepävarmuudelle olivat äänikentästä johtuva äänenpainetasojen hajonta pienillä taajuuksilla, erot mittausryhmien määrittelemissä huoneiden tilavuuksissa ja muista selvästi poikkeavat mittaustulokset. Koska alle 100 Hz:n taajuuksilla äänikenttä on epädiffuusi, hajonta pienillä taajuuksilla on suurinta, mikä aiheuttaa hajontaa myös tämän taajuusalueen huomioon ottaville mittaluvuille. Testin perusteella tilavuuden määrittämiseksi ei ole käytössä yhtenäistä menetelmää, vaan osa mittaajista tulkitsee huoneen tilavuuteen myös alakaton yläpuolisen tilavuuden. Tämä johtunee mittausstandardissa esitetyn ohjeen tulkintaeroista. Standardisoituja äänitasoerolukuja käytettäessä vastaavaa ongelmaa ei ole, koska äänitasoeroluvut määritetään pelkästään jälkikäyntä-ajan avulla eikä tilavuutta tarvita laskennassa. Tämä puoltaisi osaltaan siirtymistä standardisoitujen mittalukujen käyttöön. Ilmaääneneristysluvun R'_w mittauksissa perustellumpi tapa tilavuuden määrittämiseksi on alakaton yläpuolisen tilavuuden vähentäminen huoneen tilavuudesta.

Kiitokset

Round robin -testin käytännön järjestelyistä vastasivat Gunnar Åström (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry) ja Henrik Möller (Akukon Oy). Heidän lisäksi kirjoittajat kiittävät Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n akustiikkatoimikunnan jäseniä arvokkaista huomiosta testin raportointia tehtäessä.

Lähdeluettelo

- [1] Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2017. Ilmaääneneristävyyden round robin -testi. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laboratorio, tutkimusselostus RTEK/2491/2017. Luettavissa: <http://www.ril.fi/media/tutkimusselostus-rtek-2491-2017-ilma-e4-e4nenerist-e4vyyden-round-robin.pdf>
- [2] Hongisto, V., Keränen, J., Kylliäinen, M. & Mahn, J. 2012. Reproducibility of the present and the proposed single-number quantities of airborne sound insulation. *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 98(5), s. 811–819.
- [3] 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), s. 640–648.
- [4] 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, s. 12-18.
- [5] Takala, J. 2013. Suomalaisten asuinhuoneistojen ääniolosuhteet ja ääneneristävyyden mittaustapa. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma.
- [6] SFS-EN ISO 12999-1. 2014. Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics – Part 1: Sound insulation. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Tampere-talon laajennuksen ja tilamuutosten akustiikkasuunnittelu

Jussi Rauhala¹, Mikko Kylliäinen¹, Jesse Lietzén¹, Joose Takala¹,
Ilkka Valovirta¹ ja Mikael Ruohonen²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Tampere

² A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Espoo

Tiivistelmä

Tampere-talo valmistui vuonna 1990. Tämän jälkeen laajempia tilamuutoksia on tehty 2000-luvun alussa, mutta viime vuosina Tampereen kaupungin tavoitteena on ollut tehostaa talon käyttöä ja ylläpitää talon mainetta merkittävänä tapahtumanjärjestäjänä. Vuosina 2014–2017 toteutetun laajennus- ja tilamuutoshankkeen tarkoituksena oli uudistaa rakennus toiminnallisesti. Hankkeessa toteutettiin kahteen osaan jaettavissa oleva 400 hengen kokoustila, 230-paikkainen studiotyyppinen auditorio, pienempi kokoustila, harjoitustiloja Tampere Filharmonian muusikoille sekä uusi harjoituspaikka orkesterille korvaamaan isossa konserttisalissa aiemmin pidettyjä harjoituksia. Lisäksi Tampereelle sijoitetut ainutlaatuiset muumiaiheiset teokset saivat oman museotilansa aiemmin kongressitiloina toimineisiin saleihin. Rakennushankkeen ensimmäisen vaiheen nopea aikataulu asetti suunnitteluratkaisuille erityisiä vaatimuksia: laajennus oli toteutettava kevytrakenteisena ja samalla oli otettava huomioon rakennuksen sijainti liikennemelualueella. Laajennus toteutettiin osittain olemassa olevien tilojen päälle ja väliin ja sen alle jäi rakennuksen päähuoltoreitti. Nämä seikat oli otettava huomioon ääneneristävyuden suunnittelussa.

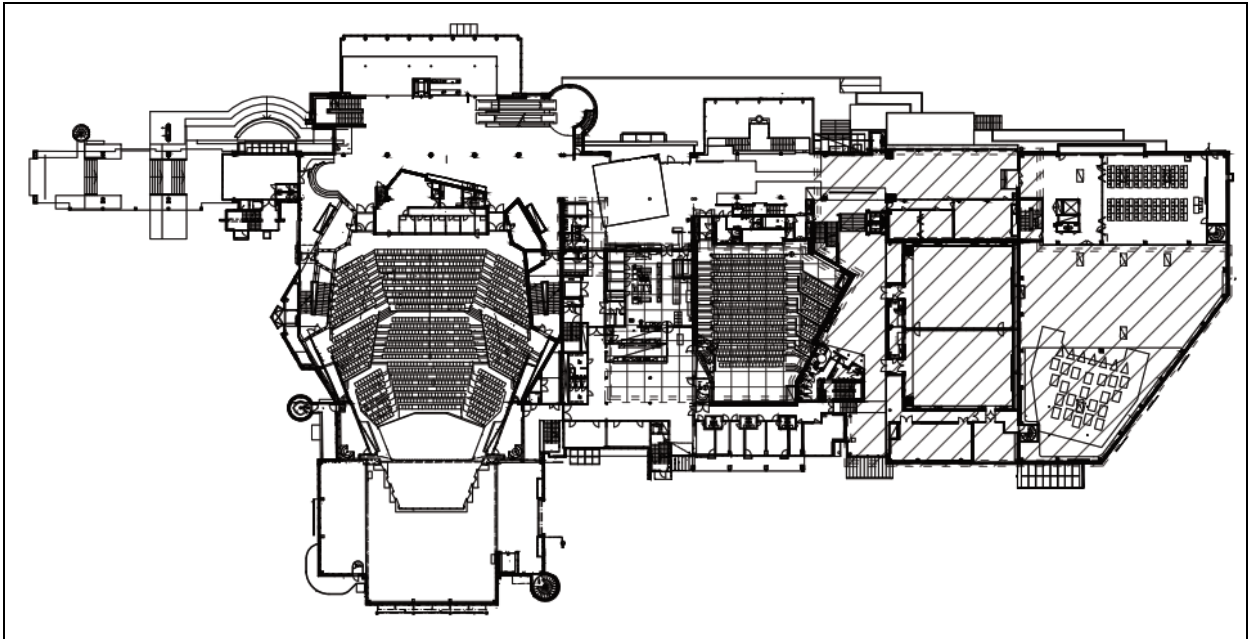
1. Johdanto

Tampere-talo valmistui vuonna 1990 konsertti- ja kongressitaloksi, jonka iso konserttisali oli tuolloin Pohjoismaiden suurin [1]. Rakennuksen valmistumisen jälkeen siihen on tehty laajempia tilamuutoksia 2000-luvun alussa. Viime vuosina Tampereen kaupungin tavoitteena on ollut tehostaa talon käyttöä ja ylläpitää sen mainetta merkittävänä tapahtumanjärjestäjänä. Vuosina 2014–2017 toteutetun laajennus- ja tilamuutoshankkeen (kuva 1) tarkoituksena oli uudistaa rakennus toiminnallisesti. Tavoitteena on nostaa vuosittaisten kävijöiden määrä 370 000 kävijästä 420 000 henkeen [2].

Laajennus- ja tilamuutoshankkeessa toteutettiin kahteen osaan jaettavissa oleva 400 hengen kokoustila Duetto, 230-paikkainen studiotyyppinen auditorio Maestro, pienempi kokoustila, ravintolatilojen laajennus, harjoitustiloja Tampere Filharmonian muusikoille sekä uusi harjoituspaikka orkesterille korvaamaan pelkästään isossa konserttisalissa aiemmin pidettyjä harjoituksia. Lisäksi Tampereelle sijoitetut ainutlaatuiset Tove Janssonin ja Tuulikki Pietilän muumiaiheiset teokset ja kuvaelmat saivat oman museotilansa, Muumimuseon, aiemmin kongressitiloina toimineisiin saleihin. A-Insinöörit Suunnittelu Oy vastasi hankkeessa rakennesuunnittelusta ja akustiikkasuunnittelusta.

Monissa rakennusalaan liittyvissä akustiikan käsi- ja oppikirjoissa [3–4] on esitetty, että akustiikkasuunnittelun tehtäväkenttä muodostuu neljästä osa-alueesta: huoneakustiikasta, ääneneristäyksestä, meluntorjunnasta ja tärinäneristäyksestä. Tämän artikkelin tarkoituksena on

kuvata, millaisia kysymyksiä akustiikkasuunnittelijan on Tampere-talon kaltaisessa mittavassa ja vaativassa rakennushankkeessa ratkaistava näillä neljällä osa-alueella.

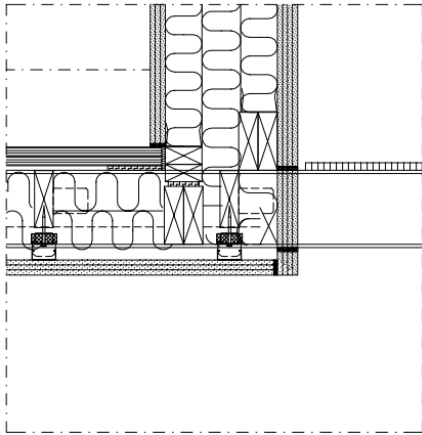


Kuva 1. Tampere-talon laajennuksen ja tilamuutosten akustisesti vaativimmat osuudet: uusien kongressi- ja kokoustilojen sekä orkesterin harjoituspaikan sijainti on esitetty vinorasterilla ja Muumimuseon ensimmäisessä ja kellarikerroksessa sijaitsevat tilat ruuturasterilla. Kuvälähde: Arkkitehdit Kontukoski Oy.

2. Ääneneristys

Uudet kongressi- ja kokoustilat sisältävä laajennusosa sijoittuu kolmelta sivulta jo olemassa olleiden rakennusmassojen väliin ja tukeutuu osin vanhoihin rakenteisiin. Rakennushankkeen ensimmäisen vaiheen erittäin lyhyt noin 8 kk rakennusaika asetti suunnitteluratkaisuille erityisiä vaatimuksia. Aikataulu sekä haastavat rakennusolosuhteet rakennuksen kellaritiloissa ja koko ajan käytössä olleen pääaulan välittömässä läheisyydessä puolsivat rakenneratkaisuja, joilla saavutetaan mahdollisimman korkea esivalmistusaste ja saadaan minimoiduksi pitkät kuivumisajat työmaalla. Näin ollen laajennuksen kantava runko toteutettiin pääosin teräsrakentein: rungon muodostavat teräsbetonitäytteiset putkipilarit sekä katon kantavat, teräksiset primääripalkit ja kattoristikot [5]. Ulkoseinät ovat kevyitä pellin ja jäykän mineraalivillan muodostamia sandwich-rakenteita.

Laajennusosan uusissa tiloissa keskeistä on ollut näiden tilojen välinen ääneneristävyys. Kaikki ääntä eristävät rakenteet ovat teräsrunkoisia ja kaksinkertaisia, myös siirtoseinät. Kevyiden ääntä eristävien rakenteiden akustisen toiminnan kannalta tärkeässä osassa ovat niiden liitokset ja tiiviys. Suuri osa akustiikkasuunnittelijan työstä onkin ollut ääntä eristävien rakenteiden liitosdetaljien sekä LVIS-järjestelmien läpivientien laatimista työmaan tarpeita palvelevalla tarkkuustasolla (kuva 2). Lisäksi akustiikkasuunnittelija on osallistunut rakennusaikaiseen valvontaan työmaalla. Ääneneristyksen kannalta erityisen vaativa tila on ollut entisten studiotilan ja kongressisalin paikalle toteutettu Muumimuseo, jonka päällä on Tampere-talon pieni konserttisali.



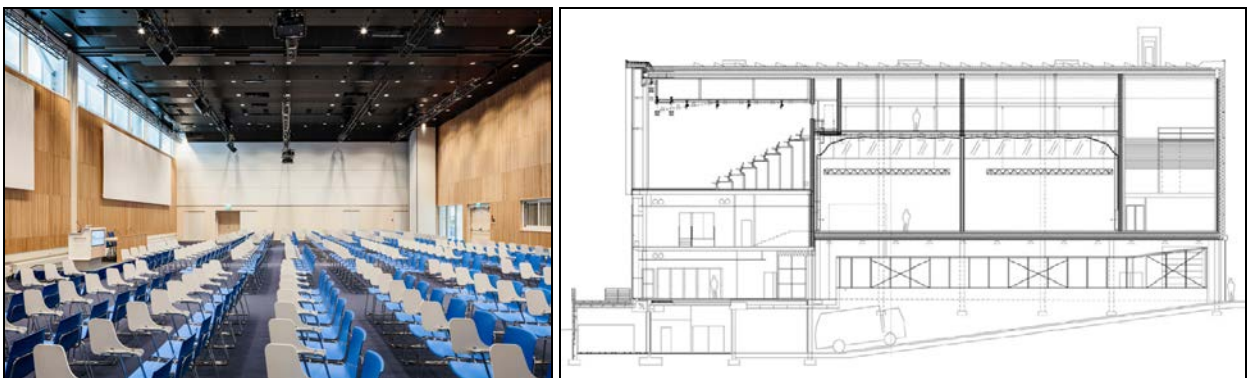
Kuva 2. Esimerkki ääntä eristävien rakenteiden liitosdetaljista. Kuvälähde: A-Insinöörit Suunnittelu Oy, akustiikkasuunnitteluyksikkö.

3. Huoneakustiikka

3.1 Duetto

Suurin Tampere-talon uusista tiloista on 400-paikkainen Duetto, joka on jaettavissa kahdeksi yli 200 henkilön saliksi. Salin mitat ovat 26,5 x 17,5 x 7,5 m (kuva 3). Salissa voidaan järjestää erilaisia kokous-, näyttely- ja juhlatilaisuuksia. Salin yläpuolella on koko salin laajuinen tekniikkakerros, josta käsin voidaan muuttaa salin mekaniikka- ja valaistusjärjestelmiä.

Duetossa käytetään aina sähköistä äänentoistoa, ja huoneakustiikka on suunniteltu tältä pohjalta. Erityistä huomiota on kiinnitetty siihen, että tilassa ei muodostuisi puheenselvyyttä häiritseviä kaikuilmiöitä. Tilojen pintamateriaalien valinnalla ja muodoilla onkin saatu aikaan tilanne, että erityisen häiritseväksi tällaisissa tiloissa koettavaa tärykaikua ei esiinny. Suurin osa näistä huoneakustisista ratkaisuista on käytännön syistä piilotettu pintarakenteiden sisään.



Kuva 3. Valokuva Duetto-tilasta, kun koko tila on käytössä (vas.) sekä leikkauspiirustus tilan sijainnista (oik.). Leikkauspiirustuksessa nähdään vasemmalla myös uusi Maestro-tila. Kuvälähteet: Tampere-talo Oy:n kuvapankki (kuvaaja: Tuomas Uusheimo) ja Arkkitehdit Kontukoski Oy.

3.2 Maestro

Maestro on Tampere-talon 3. kerroksessa sijaitseva on 230-paikkainen auditorio, jossa on

siirtokatsomo. Tilaa käytetään muun muassa puhetilaisuuksissa, black box -tyyppisenä teatteritilana, yritystilaisuuksissa, elokuvaesityksissä, tanssiesityksissä sekä monenlaisissa muissa esittävän taiteen tilaisuuksissa. Myös Tampereen Oopperan kuoro harjoittelee tilassa, jolloin siirtokatsomo on ajettu kokoon.

Maestron huoneakustiset suunnitteluratkaisut (kuva 4) ovat paljolti samanlaisia kuin Dueton: tilassa ei ole yhdensuuntaisia pintoja, ja lisäksi osa pinnoista on ääntä sirottavia. Maestroa voidaan käyttää myös ilman äänentoistoa, minkä johdosta tilaan on järjestetty puhujan äänen tukemiseksi ääntä heijastavia pintoja, joita Duetossa ei ole.



Kuva 4. Valokuva Maestro-tilasta. Kuvalähde: Tampere-talo Oy:n kuvapankki (kuvaaja Tuomas Uusheimo).

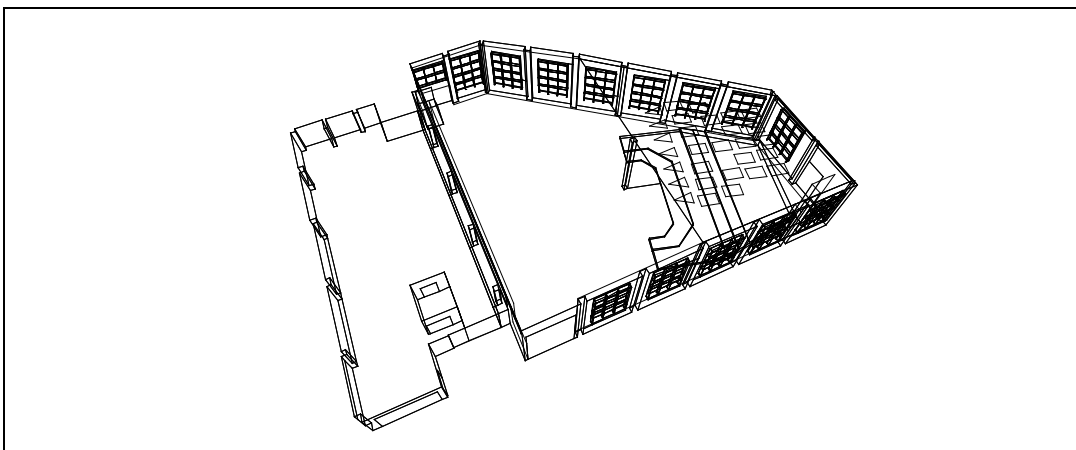
3.3 Orkesterin uusi harjoituspaikka

Tampere-talossa esiintyy ja harjoittelee Tampere Filharmonia, joka on 97-henkisenä orkesterina ainoa täysikokoinen sinfoniaorkesteri pääkaupungin ulkopuolella. Orkesteri on harjoitellut pääasiassa Tampere-talon isossa konserttisalissa, mutta talon tilojen käytön tehostuessa sille tarvitaan myös toinen harjoitustila. Uusi harjoitustila on rakennettu tavallisesti näyttely- ja esiintymistilana toimivaan Sorsapuistosaliin.

Suunnittelun tavoitteena oli saada uuden harjoitustilan akustiset ominaisuudet mahdollisimman lähelle Tampere-talon ison konserttisalin lavaa ottaen kuitenkin huomioon käytännön lähtökohtina Sorsapuistosalin ominaisuudet sekä siellä olevat äänentoistojärjestelmät ja mekaniikka, joita ei ollut mahdollista siirtää muualle. Suunnittelun lähtötiedoksi mitattiin ison konserttisalin lavaparametrit standardin ISO 3382-1 [6] mukaisella mittausmenetelmällä.

Uuden harjoitustilan suunnittelussa käytettiin huoneakustista tietokonemallinnusta (Odeon), jonka avulla määritettiin Sorsapuistosaliin tarvittavien lisärakenteiden paikat ja ominaisuudet.

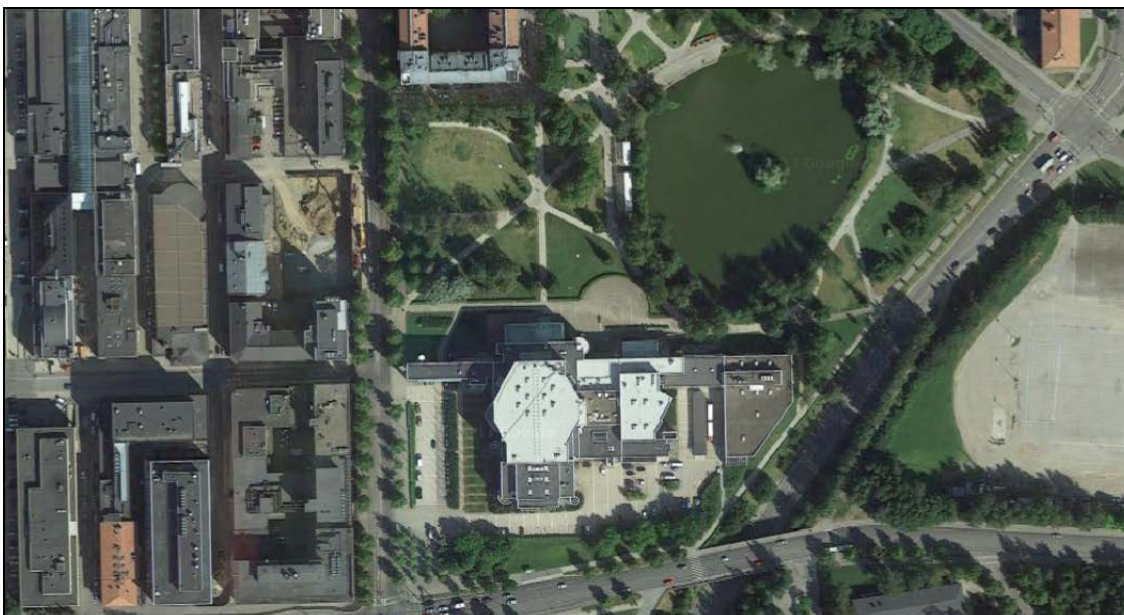
Kuvassa 5 on esitetty uuden harjoitustilan tilamalli. Hankkeessa toteutettiin myös uusia harjoitushuoneita muusikoille.



Kuva 5. Orkesterin harjoitustilan huoneakustinen tietokonemalli. Kuvalähde: A-Insinöörit Suunnittelu Oy, akustiikkasuunnitteluyksikkö.

4. Meluntorjunta

Tampere-talon välittömässä läheisyydessä on kaksi vilkasta liikenneväylää, joiden melu ei saa häiritä talossa tapahtuvaa toimintaa. Koska laajennusosa oli lyhyen rakennusajan johdosta tehtävä kevytrakenteisena, liikennemelu muodostui rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyttä mitoittavaksi tekijäksi. Toisaalta rakennuksessa tapahtuva toiminta, kuten elokuvien ja musiikin toistaminen suurilla äänenvoimakkuuksilla, ei saa häiritä läheisiä asuinrakennuksia, mikä myös otettiin huomioon rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä suunniteltaessa. Suunnittelun lähtökohdana olivat asumisterveysasetuksessa [7] asetetut melun raja-arvot. Erityisen vaativa osa rakennuksen ulkovaipasta oli Maestro-salin 9 m korkea ja lähes ulkoseinän levyinen ikkuna, joka avautuu Sorsapuistoon (kuva 4).



Kuva 6. Tampere-talon lähellä on vilkkaita liikenneväyliä, joiden melu ei saa häiritä talon toimintaa. Toisaalta toiminta talossa ei saa häiritä läheisiä asuinrakennuksia. Kuvalähde: Google Maps.

5. Tärinäneristys

Tavanomaisten rakennusten teknisten järjestelmien tärinäneristysten lisäksi tärinäneristimiä on käytetty ääntä eristävien väliseinärakenteiden tuennoissa ja ääntä eristävien alakattojen ripustuksissa.

Poikkeuksellisia vaatimuksia tärinäneristykselle ovat asettaneet Muumimuseon kokoelmiin kuuluvat erittäin hauraat taideteokset (kuva 7), joiden värähtelylle museo määritteli sallitut raja-arvot. Näiden raja-arvojen saavuttaminen ei olisi ollut mahdollista perinteisillä tärinäneristinratkaisuilla, joten värähtelyn hallintaan on käytetty poikkeuksellisesti vastavärähtelijöitä, joiden ominaistajuudet on säädetty kohdalleen museossa tehtyjen mittausten perusteella. Lisäksi toteutettiin pitkäaikainen seurantamittaus Muumimuseon avauduttua.



Kuva 7. Näkymiä Muumimuseosta. Kuvalähde: Tampere-talo Oy:n kuvapankki (kuvaaja Jari Kuusenaho, Tampereen taidemuseo).

Lähdeluettelo

- [1] Järvelä A, Tampere-talo – 20 vuotta talon tapaan, Tampere-Talo Oy, Tampere, 2010.
- [2] Kontukoski P, Tampere-talon muutos ja laajennus, Teräsrakenne, 2(2017), s. 40–41.
- [3] Kylliäinen M, Talonrakentamisen akustiikka, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikan laitos, tutkimusraportti 137, Tampere, 2006.
- [4] Kylliäinen, M & Hongisto V, RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 2007.
- [5] Uosukainen V & Kivistö H, Tampere-talon muutos ja laajennus – rakennesuunnittelu, Teräsrakenne, 2(2017), s. 42–43.
- [6] ISO 3382-1, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces, International Organization for Standardization, Genève, 2009.
- [7] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.

Betonirakenteisten alalaattavälipohjien ääneneristävyyden korjaaminen nykytasoon kevytrakennetekniikalla

Arto Hyttinen
Saint-Gobain Finland Oy

Tiivistelmä

Vanhoiden asuinkerrostalojen betonivälipohjarakenteiden tekniset ominaisuudet eivät ole nykytasolla. Puutteita esiintyy paloturvallisuudessa, ääneneristyksessä sekä esteettömyydessä. Tässä artikkelissa kuvattavan hankkeen tuloksena saatiin kehitetyksi kevytrakenteinen rakenneratkaisu, jonka avulla betonisten alalaattavälipohjien tekniset ominaisuudet saadaan parannetuksi nykytasoa vastaaviksi. Tämä artikkeli keskittyy ääneneristävyyteen ja värähtelyyn. Esitys perustuu lähteisiin, joissa on laajemmin kuvattu välipohjan kehitystyötä erilaisista teknisistä näkökulmista.

1. Johdanto

1900-luvun alusta 1960-luvulle rakennettujen asuinkerrostalojen betonivälipohjien askelääneneristävyys on usein luokkaa 10 dB heikempi kuin mitä nykyisissä ääneneristysmääräyksissä edellytetään. Toisaalta toimisto-, liike- ja tehdasrakennusten käyttötarkoituksen muutoksissa asuinrakennuksiksi on saavutettava nyky määräysten edellyttämä ääneneristystaso. Lähtökohtana kuitenkin on usein rakennus, jolla ei alkujaan ole ollut edes erityisiä tarpeita asettaa akustisia vaatimuksia. Betonirakenteinen alalaattapalkisto on ollut yleinen välipohjan rakenneratkaisu 1900-luvun alusta 1950-luvulle asti. Korjausrakentamishankkeissa ja käyttötarkoituksen muutoksissa on usein ongelmana se, että rakennepaksuuksia ei huonekorkeuden tai ovien ja porrashuoneiden korkojen vuoksi ole välttämättä mahdollista korottaa kovin paljon. Myös esteettömyysnäkökohdat on otettava huomioon. Siksi välipohjan ääneneristävyyttä parantavan rakenneratkaisun on edullista olla rakennepaksuudeltaan mahdollisimman matala. Korjausrakentamisessa tilanne on usein lisäksi sellainen, että vanhaa välipohjaa täydentävät rakenteet eivät voi lisätä kantavan rakenteen kuormitusta. [1]

2. Betonirakenteisten alalaattavälipohjien korjaamisen suunnittelun lähtökohdat

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava, että huomioidaan maankäyttö- ja rakennuslain asetuksista 117 a-117 g §:ssä tarkoitetut olennaiset tekniset vaatimukset. Tämä koskee rakentamiseen ryhtyvän toimenpidettä niin korjausrakentamisessa, käyttötarkoituksen muutoksessa tilassa/rakennuksessa sekä uudiskohteissa.

2.1 Alalaattapalkistojen rakenteet

Vuosina 1900–1915 asuinkerrostalojen välipohjia tehtiin rataakiskojen tai I-terästen varaan. Välipohjan alapinnassa käytettiin (teräs)betonilaattaa, joka valettiin kantavien rakenteiden väliin. Betonilaatan paksuus oli 120 mm, kun betonilaattaa ei ollut raudoitettu ja raudoitettu betonilaatta oli vain 60–80 mm.

Täyteaineita käytettiin välipohjissa ääni- ja lämmityssyiden takia. Luonnollisesti täyteaineet saatiin rakennustöiden yhteydessä sekä lisänä esim. sahanpurua, turvetta, kutterin-lastua, olkea, hiekkaa, masuunikuonaa ja ruukinporoa. Täyteaineiden asennusjärjestys oli kevyin materiaali alimmaiseksi ja -painavin päällimmäiseksi. Lattialauta oli valmiiksi pontattu, jonka paksuus oli 1½ tuumaa ja vapaa jänneväli noin 600 mm.

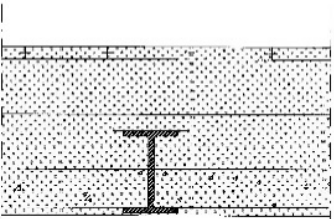
Erilaisten kokeilujen kautta vuoteen 1920 mennessä vakiintui alalaattapalkisto välipohjatyyppiksi asuin-, virasto-, liike-, terveydenhuolto-, oppilaitos- ja muihin rakennuksiin.

Alalaattapalkiston rakenne koostui rautabetonipalkeista, poikkileikkausmuotona 100–150 mm leveä x 300–400 mm korkeana palkkina, joiden keskietäisyys noin 1000 mm-1300 mm. Jänneväli tavanomaisesti oli huoneen mittainen eli 5-6 metriä. Mahapalkin keskiöosaa levennettiin jopa 300 mm asti. Laippapalkiston yläosan paksuus oli 80–120 mm ja leveys vaihteli jopa niin paljon, että laipat yhtyvät keskenään. Laipat alalaattapalkistossa jätettiin raudoittamatta tai raudoitettiin hyvin kevyesti. Alalaatan betoni paksuus oli yleensä 40 mm, mutta myös 30 mm paksuisia alalaattarakenteita esiintyi silloin, kun palkiston keskioväli oli alle 1200 mm.

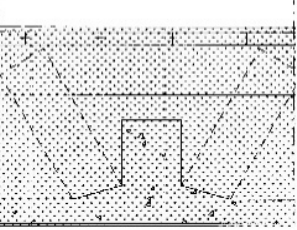
Raudoitus oli kevyttä alalaatassa eli halkaisijaltaan 5 mm raudoitus k k 200 mm ja jakoraudat 2 Ø 5 mm /palkkiväli.

2.2 Ääneneristävyys alalaattapalkistoissa

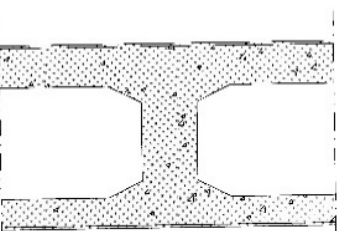
Ensimmäiset säädökset äänestä esitettiin L 26/1920 (helmikuussa 13) eräistä naapurisuhteista. Vaatimukset esitettiin sanallisesti ja eikä näitä voinut todeta mittauksin. Mittaluvut tulivat ensimmäistä kertaa suosituksina vuonna 1955, jossa ilmaääneneristävyys oli vaakasuuntaan 51 dB ja pystysuuntaan 51 dB. Välipohjan askeläänitasoluvuksi suositus oli 62 dB.

	<p>PERUSRAKENNE :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lauta - korokepuut - kiilaus - betoni 50 – 70 mm - rappaus + pintakäsittely 	R' w (dB)	L' n, w (dB)	
		55 – 59	1. kova päällyste	2. joustava päällyste
			58 – 62	54 – 58

Kuva 1. Alalaattapalkisto 1910–1920-luku (asuinkerrostalot), ei vaatimustasoa [3].

	<p>PERUSRAKENNE :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lauta - korokepuut / täyte - alalaattapalkisto - rappaus - pintakäsittely 	R' w (dB)	L' n, w (dB)	
		52 – 55	1. kova päällyste	2. joustava päällyste
			58 – 62	54 – 58

Kuva 2. Alalaattapalkisto 1930–1950-luku (asuinkerrostalot), ei vaatimustasoa [3].

	<p>PERUSRAKENNE :</p> <ul style="list-style-type: none"> - päällyste - betoninen kaksoisalaattapalkisto, ylälaatta n. 70 mm - ontelolaatta / täyte - alalaatta n. 50 mm - rappaus - pintakäsittely 	R' w (dB)	L' n, w (dB)	
		52 – 55	1. kova päällyste	2. joustava päällyste
			66 – 70	54 – 58

Kuva 3. Kaksoisalaattapalkisto 1930–1950-luku (asuinkerrostalot), ei vaatimustasoa [3].

Kuvista 1-3 selviää, että rakenteilla ei ole vaatimustasoa ääneneristävyydelle.

Korjaushankkeeseen ryhtyvälle voi tulla yllätyksenä, että ääneneristys taso pitää yhtä hyvänä kuin alkuperäinen rakenne tai päivittää nykyiselle tasolle. Sosiaali- ja terveysministeriö on antanut terveydensuojelulain nojalla asetuksen (545/2015) asunnon tai muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista. Taulukossa 1 on esitetty raja-arvot melulle.

Taulukko 1. Päivä- ja yöajan keskiäänitasojen toimenpiderajat asunnoissa ja muissa oleskelutiloissa.

Huoneisto ja huonetila	Päiväajan keskiäänitaso L_{Aeq} (klo 7-22)	Yöajan keskiäänitaso L_{Aeq} (klo 22-7)
Asuinhuoneistot, palvelutalot, vanhainkodit, lasten päivähoitopaikat ja vastaavat tilat		
asuinhuoneet ja oleskelutilat	35 dB	30 dB
muut tilat	40 dB	40 dB
Kokoontumis- ja opetushuoneistot		
huonetila, jossa edellytetään yleisön saavan hyvin puheesta selvän ilman äänenvahvistuslaitteiden käyttöä	35 dB	-
muut kokoontumistilat	40 dB	-
Työhuoneistot (asiakkaiden kannalta)		
asiakkaiden vastaanottotilat ja toimistohuoneet	45 dB	-

3. Debel-kerroslattiajärjestelmä alalaattapalkisto ratkaisuisa

Debel-kerroslattiajärjestelmä on kantavan välipohjan tai välipohjapalkiston päälle rakennettava erotettu tärinäneristimiin perustuva lattiarakenne. Kerroslattiajärjestelmä muodostuu Saint-Gobain Finland Oy:n Gyproc GL15 Lapikas kipsilevyistä ja Aulis Lundell Oy:n ProfAL-teräsprofiilijärjestelmästä. ProfAL-teräsprofiilien materiaaleina käytetään DX51D+Z ja S350GD+Z lujuuksia. Lattiarakenteen pintakerros muodostuu kahdesta Gyproc GL15 Lapikas kipsilevystä. Levyt asennetaan poikittain suhteessa hattulistoihin ja levykerroksien saumat limitetään. Levykerroksien väliin levitetään sideaineeksi joko laastia tai liimaa, jotta voidaan varmistua yhtenäisestä levykentästä. Kipsilevyt tukeutuvat hattulistoihin jotka muodostavat rakenteesta riippuen joko sekundääri- tai primääripalkiston. Debel-kerroslattiasta on kolme eri sovellusta: madallettu-, perus- ja korkearakenne. Madallettua rakennetta käytetään huonetiloissa, joissa rakenteen korkeus tulee olla mahdollisimman pieni. Madalletusta rakenteesta on myös olemassa kantavien välipohja- tai alapohjapalkkien väliin tuleva sovellus Debel-kerroslattiajärjestelmän korkeus vaihtelee 40 m:stä 800 mm:iin.[2]

3.1 Tärinän ja taipuman mitoitus

Värähtelymitoitus aloitetaan selvittämällä välipohjan ominaisvärähtelytaajuus (yhtälö 1). Ympäristöministeriön [4] mukaan ominaisvärähtelytaajuuden ollessa enemmän kuin 3 Hz, on lattia korkeataajuinen ja tulee mitoituksen kriteereinä käyttää paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa kokonaistaipumaa (yhtälöt 1–5) ja pintarakenteen paikallista taipumaa (yhtälö 6). Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:llä suoritetujen testien mukaan Debel-kerroslattian ominaisvärähtelytaajuus asettuu välille 16–25 Hz, joten tässä kappaleessa esitellään vain korkeataajuisen lattian mitoitus.

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_1}{m_h}} \cdot \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{l}{b_h}\right)^2 + \left(\frac{l}{b_h}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_1}} \quad (1)$$

missä l = lattiapalkin tukiväli
 $(EI)_1$ = lattian suurempi lattiapalkkien suuntaa vastaava jäykkyys
 m_h = välipohjan massa pinta-alayksikköä kohden + hyötykuormasta osuus 30 kg/m^2 ,
 b_h = mitoitettavan huoneen leveys
 $(EI)_b$ = lattian heikomman suunnan jäykkyys

Lattiapalkkien suunnan jäykkyys $(EI)_1$ on laskettu yhteisvaikutuksena hattuprofiilin ja kipsilevyjen jäykkyytenä. Heikomman suunnan jäykkyyteen $(EI)_b$ on otettu huomioon vain kipsilevyjen jäykkyys.

Värähtelyjen suuruuden arviointiin on määritetty värähtelyluokat (taulukko 2), joista suunnittelija valitsee tilaajan kanssa sopivan projektissa käytettävän luokan. Värähtelyluokka määrää välipohjalle määrittävät kriteerit (taulukko 3) [4].

Taulukko 2. Värähtelyluokka [4].

Värähtelyluokka	Värähtelyluokan soveltamisalue
A	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esimerkiksi omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

Jos lattian suurin pituus tai leveys on alle 6 metriä, voidaan runkorakenteelle määritettyjä arvoja korottaa yhtälöstä (2) laskettavalla kertoimella [4].

$$k = \frac{1}{0,318 + 0,114x} \quad (2)$$

missä x = lattian suurin pituus tai leveys

Taulukko 3. Välipohjan värähtelyn kriteerit [4].

Värähtelyluokka	Kriteeri lattian rungolle		Kriteeri paikalliselle taipumalle1)
	Korkeataajuiset lattiat	Matalataajuiset lattiat	Sekä korkea- että matalataajuiset lattiat
A	$\delta_0 < 0,12 \text{ mm}$	$a < 0,03 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,12 \text{ mm}$
B	$\delta_0 < 0,25 \text{ mm}$	$a < 0,05 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,25 \text{ mm}$
C	$\delta_0 < 0,50 \text{ mm}$	$a < 0,075 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 0,50 \text{ mm}$
D	$\delta_0 < 1,0 \text{ mm}$	$a < 0,12 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 < 1,0 \text{ mm}$
E	$\delta_0 > 1,0 \text{ mm}$	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	$\delta_1 > 1,0 \text{ mm}$

Kokonaistaipumassa lasketaan 1 kN:n kuormituksesta aiheutuvan ortotrooppisen laatan keskipisteen taipuma (yhtälö 3) ja lattiasta erotetun korvauspalkin taipuma (yhtälö 4). Pienempää taipumaa käytetään kokonaistaipuman laskennassa. Kokonaistaipuma saadaan lisäämällä pintalaatan paikallisen taipuman arvo (yhtälö 5) ortotrooppisen laatan tai korvauspalkin taipumaan [5].

$$\delta_0 = \frac{1}{42 \cdot \left[\frac{(EI)_k}{(EI)_1} \right]^{1/4}} \cdot \frac{Fl^2}{(EI)_1} \leq \delta_{max} \quad (3)$$

missä $(EI)_b$ = lattian heikomman suunnan jäykkyys
 $(EI)_1$ = lattian suurempi lattiapalkkien suuntaa vastaava jäykkyys
 F = pistekuorma 1 kN
 l = hattulistan jänneväli
 δ_{max} = korvauspalkin taipuma [5].

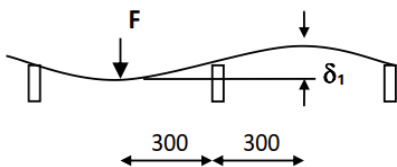
$$\delta_{max} = \frac{Fl^2}{48L(EI)_1} \quad (4)$$

missä $(EI)_1$ = lattian suurempi lattiapalkkien suuntaa vastaava jäykkyys
 F = pistekuorma 1 kN,
 l = hattulistan jänneväli
 L = on hattulistan k/k jako [5]

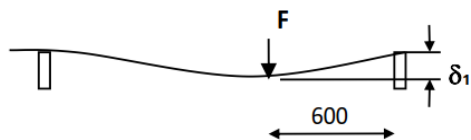
$$\delta_{paik} = \frac{0,015FL^2}{(EI)_b} \quad (5)$$

missä F = pistekuorma 1 kN,
 L = hattulistan k/k jako ja $(EI)_b$ on lattian heikomman suunnan jäykkyys

Paikallisessa taipumassa lasketaan pintalaatan taipumaa 1 kN:n pistekuorman kohdalla josta erotetaan 600 mm:n etäisyydellä olevan taipuman arvo (yhtälö 6). Itseisarvoilla laskiessa taipuman arvot summataan toisiinsa. Paikallisen taipuman tarkastelussa ei tarvitse ottaa huomioon lattiapalkkien taipumista [4]. Debel-kerroslattian kohdalla HTL- ja HTLR- profiilien jakoväli on rajoitettu välille 200 mm – 600 mm. Kun profiilin k-jako on 600 mm ja 500 mm, paikallinen taipuma lasketaan kuvan 16 mukaisesti summaamalla taipuma pistekuorman alla ja taipuma 600 mm päässä. Kun profiilin k-jako on väliltä 400 mm – 200 mm, 600 mm päässä laskettava taipuma ei mahdu enää viereiseen kenttään. Tällöin paikallisen taipuman arvo lasketaan kuvan 5 mukaisesti ottamalla huomioon vain pintarakenteen keskipisteen taipuma.



Kuva 4. Paikallinen taipuma k600 ja k500 [4].



Kuva 5. Paikallinen taipuma $k400$, $k300$ ja $k200$ [4].

Paikallisen taipuman laskemista varten jouduttiin määrittämään elementtimenetelmillä taipuman kaavat, koska paikallisen taipuman laskennasta ei löytynyt valmiita kaavoja. Paikallisen taipuman kaavojen laskenta löytyy lähteestä 2.

Elementtimenetelmillä johtamalla paikallisen taipuman kaava saadaan yhtälön (6) mukaiseen muotoon, jossa kerroin k muuttuu hattulistan jakovälin mukaan.

$$\delta_1 = k \frac{FL^2}{(EI)_b} \quad (6)$$

missä k = hattulistan k -jaosta riippuva kerroin,
 F = pistekuorma 1 kN
 L = hattulistan k -jako
 $(EI)_b$ = kipsilevyn jäykkyys heikompaan suuntaan.

4. Yhteenveto

Korjausrakennatarkaisu vanhojen betonirakenteisten alalaattaväli­pohjien osalta on akustisesti oikein mitoitettuihin tärinäneristimiin perustuva levyrakenteinen kerros­lattiajärjestelmä Debel. Korjausrakentamisen alalaattaväli­pohjien kohteissa tehtyjen ääneneristysmittausten perusteella Debel-kerros­lattiajärjestelmällä on saavutettavissa ilmaääneneristyslukuksi R'_w päällekkäisten huoneistojen välille 63–68 dB ja askeläänitasoluvuksi $L'_{n,w}$ 40–43 dB. Ääneneristävyyden lisäksi kevytrakenteisen lattiajärjestelmän mitoituksessa on otettava huomioon lattian värähtely­ominaisuudet. Tehtyjen selvitysten mukaan Debel-kerros­lattiajärjestelmä ominaistaajuus asettuu välille 16–25 Hz. Tällöin lattian mitoituskriteerinä käytetään paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa kokonaistaipumaa.

Lähdeluettelo

- [1] Hyttinen, A. 2017. 1900-luvulla rakennettujen betonirakenteisten väli­pohjien korjaaminen nykytasoon kevytrakennetekniikalla. Opinnäytetyö. Tampere, Tampereen ammattikorkeakoulu, rakentamisen ja talotekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto. 105 s.
- [2] Laahanen, J. 2017. Debel-kerros­lattia HTL- ja HTLR-profiilien mitoitushjelma. Opinnäytetyö. Tampere, Tampereen ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma. 61 s.
- [3] Arkkitehti Alpo Halme ja Kehityspäällikkö Seppo Leimala. Gyproc-Kevytrakennetekniikka, Väli­pohjien ääneneristyksen parantaminen. Huhtikuu 1998
- [4] Ympäristöministeriö 2017. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. 96 s.
- [5] Talja & Toratti. Rakentajain kalenteri 2003 Helsinki. 472–473 s.

Julkisivurakenteiden ääneneristävyys pientaajuuksilla

Valtteri Hongisto, Jukka Keränen ja Jarkko Hakala
Turun ammattikorkeakoulu, sisäympäristö

Tiivistelmä

Tavoite oli mitata erilaisten julkisivurakenteiden ääneneristävyys taajuusalueella 50–5000 Hz ja julkisivurakenteen tuottama äänitasoero taajuusalueella 5–200 Hz. Mittauksia tehtiin 10 rakennuksessa yhteensä 20 eri julkisivurakenteelle. Ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan oli 31–51 dB $R'_{45,w} + C_{tr}$. Julkisivurakenteiden tuottama äänitasoero vaihteli 3 ja 40 dB välillä pienillä taajuuksilla 20–200 Hz. Infraäänialueella 5–16 Hz vaihteluväli oli -3...+30 dB. Ilmaääneneristävyys ja äänitasoero riippuivat taajuudesta, rakennusmateriaaleista, rakenteista, ikkunoiden pinta-alasta ja mittauspisteen sijainnista. Tuloksista johdettiin tilastollinen estimaatti ilmaääneneristyskyvystä, joka ylittyy suomalaisten pientalojen tapauksessa 90 % todennäköisyydellä. Estimaattia voidaan hyödyntää pientalojen sisätilaan kulkeutuvan ympäristömelun laskelmissa.

1. Johdanto

Pientalojen julkisivurakenteiden ilmaääneneristävydestä ei ole juurikaan julkaistua tutkimustietoa. Tietoa kuitenkin tarvitaan, kun arvioidaan ympäristömelun äänenpainetasoa sisätiloissa. Julkisivurakenteen ilmaääneneristävyys mitataan nykyään ISO 16283-3 standardin mukaan taajuusalueella 50–5000 Hz [1]. Menetelmä on pääpiirteittäin samanlainen kuin aiemmin käytetty ISO 140-5 standardin menetelmä [2]. Alle 50 Hz taajuusalueella ilmaääneneristävyttä ei ole yleensä mitattu, koska standardi ei tue mittauksia eikä äänilähteinä käytetyt kaiuttimet yleensä kykene tuottamaan riittävää äänenpainetasoa. Ympäristömelua kuitenkin esiintyy myös alle 50 Hz taajuuksilla. Viime aikoina on pohdittu myös sitä, miten infraäänit (<20 Hz) kantautuvat sisätiloihin.

Tutkimuksen tavoite oli mitata erilaisten julkisivurakenteiden tuottama äänitasoero pientaajuusalueella 5–200 Hz. Lisäksi tavoitteena oli mitata standardin ISO 16283-3 mukainen julkisivu-rakenteen ääneneristävyys taajuusalueella 50–5000 Hz.

2. Aineistot ja menetelmät

2.1 Mittauskohteet

Mittauskohteet olivat asuttuja pientaloja Suomessa. Kohteet valittiin niin, että mukana oli puurakennuksia, kuten hirsitalot, ja kivirakenteisia pientaloja, kuten tiili- ja betonitalot. Jokaisessa kohteessa mitattiin ikkunallinen julkisivuseinä ja mahdollisuuksien mukaan myös ikkunaton seinä.

2.2 Mittausmenetelmät

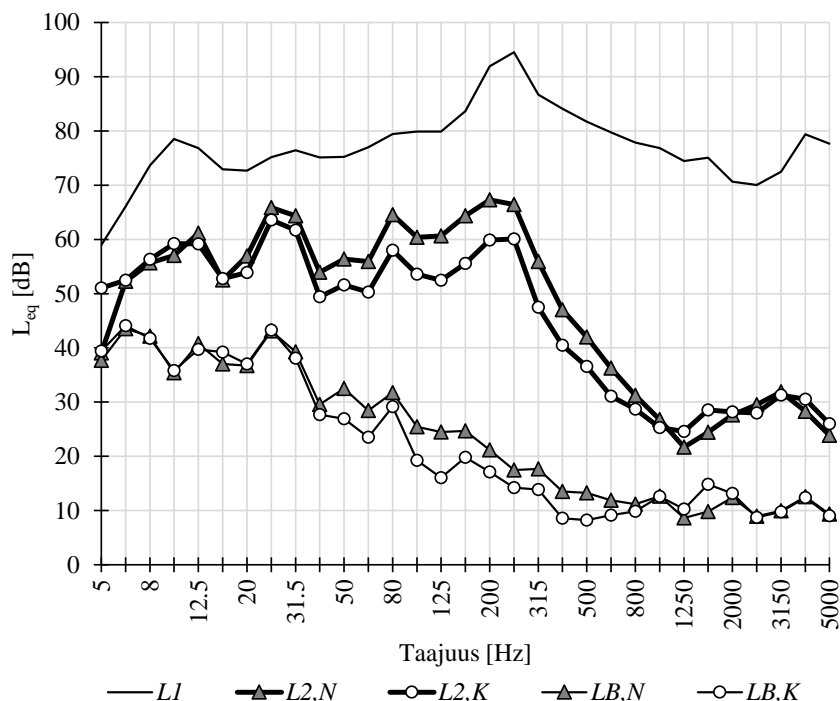
Mittauksessa käytettiin kolmea äänilähdettä. Jokaisella äänilähteellä toistettiin toisiinsa nähden korreloimatonta laajakaistaista vaaleanpunaista kohinaa. Äänilähteet ja niiden taajuusalueet olivat

seuraavat: pallokaiutin (Norsonic Nor276) ja signaaligeneraattorilla 1 varustettu vahvistin (Norsonic Nor280), 80–5000 Hz, pientaajuusalueen aktiivikaiutin (Genelec 7050B) ja signaaligeneraattori 2 (Neutrik MR1), 25–80 Hz, infraäänikaiutin (Persub), päätevahvistin (Behringer EP4000), taajuussuodin (Behringer Super X-Pro) ja signaaligeneraattori 3 (NTI Audio MR-Pro), 5–25 Hz.

Mittauksissa noudatettiin ISO 16283-3 mukaisia ohjeita. Äänilähteet sijoitettiin lähekkäin noin 5 metrin etäisyydelle mitattavasta julkisivusta vaakasuunnassa 45 asteen kulmaan.

Äänenpainetasot mitattiin terssikaistoittain taajuusalueella 5–5000 Hz äänianalysointilaiteella (Norsonic NOR150) ja kondensaattorimikrofonilla (Norsonic NOR1225). Äänitasomittari kalibroitiin ennen ja jälkeen mittausten. Ulkona äänenpainetaso mitattiin hyvin lähellä julkisivupintaa (alle 20 mm) äänilähteiden 1–3 käydessä 5 pisteen keskiarvona. Sisällä äänenpainetaso mitattiin äänilähteiden 1–3 käydessä 4 nurkkapisteessä ja 5 pisteessä huoneen keskialueella. Nurkkapisteissä etäisyys rajapinnoista oli noin 30 cm (nurkkapisteestä 50 cm) ja keskialueen pisteissä vähintään 50 cm ja yleensä yli 100 cm huonepinnoista ja kalusteista. Kun äänilähteet oli kytketty pois päältä, mitattiin taustamelutaso sisällä samoissa 9 pisteessä, jotta voitiin tehdä taustamelukorjaus. Jokaisen mittauksen kesto oli 30 sekuntia. Esimerkki ulkona ja sisällä mitatuista äänenpainetasoista esitetään kuvassa 1.

Äänenpainetasomittausten jälkeen mitattiin huoneessa jälkikaiunta-aika käyttäen äänilähteitä 1 ja 2. Kohinasignaali tuotettiin signaaligeneraattorilla (NTI-Audio MR-Pro). Äänilähteen paikkoja oli yksi ja mittauspisteitä kolme. Jokaisessa pisteessä tehtiin kaksi mittausta. Jälkikaiunta-aika T [s] määritettiin äänitason 20 dB vaimenemiseen kuluvan ajan perusteella taajuusvälillä 50 – 5000 Hz.



Kuva 1. Esimerkkikohteen julkisivupinnalla (1) mitattu äänenpainetaso L_1 , rakennuksen sisällä (2) huoneen nurkissa (N) ja keskialueella (K) mitatut äänenpainetasot $L_{2,N}$ ja $L_{2,K}$ kohinasignaalit päällä ja taustamelutasot $L_{B,N}$ ja $L_{B,K}$ kohinasignaalit sammutettuina.

Huoneen absorptioala A [m²] määritettiin jälkikaiunta-ajan T ja huoneen tilavuuden V [m³]

avulla:

$$A = 0.16V/T \quad (1)$$

Tuloksia L_1 , $L_{2,K}$, $L_{2,N}$, ja A käytettiin ISO 16283-3 mukaiseen ilmaääneneristävyyden määrittämiseen:

$$R'_{45^\circ} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log_{10}[S/A] - 1,5 \text{ dB} \quad (2)$$

missä S on huoneen julkisivupinta-ala [m^2] ja

$$L_2 = \begin{cases} L_{2,K} & \text{kaistoilla } 100 \dots 5000 \text{ Hz} \\ 10 \cdot \log_{10} \left[\left(10^{0,1 \cdot L_{2,N}} + 2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{2,K}} \right) / 3 \right] & \text{kaistoilla } 50 \dots 80 \text{ Hz} \end{cases} \quad (3)$$

Ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan $R'_{45,w} + C_{tr}$ määritettiin ISO 717-1 mukaan [3].

Äänitasoerot DL määritettiin terssikaistoilla 5 – 200 Hz ulkona mitatun äänenpainetason (5 pisteen energiakeskiarvo) L_1 ja sisällä mitatun taustamelukorjatun äänenpainetason L_2 erotuksena jokaisessa 9 pisteessä:

$$DL = L_1 - L_2 - 6 \text{ dB} \quad (4)$$

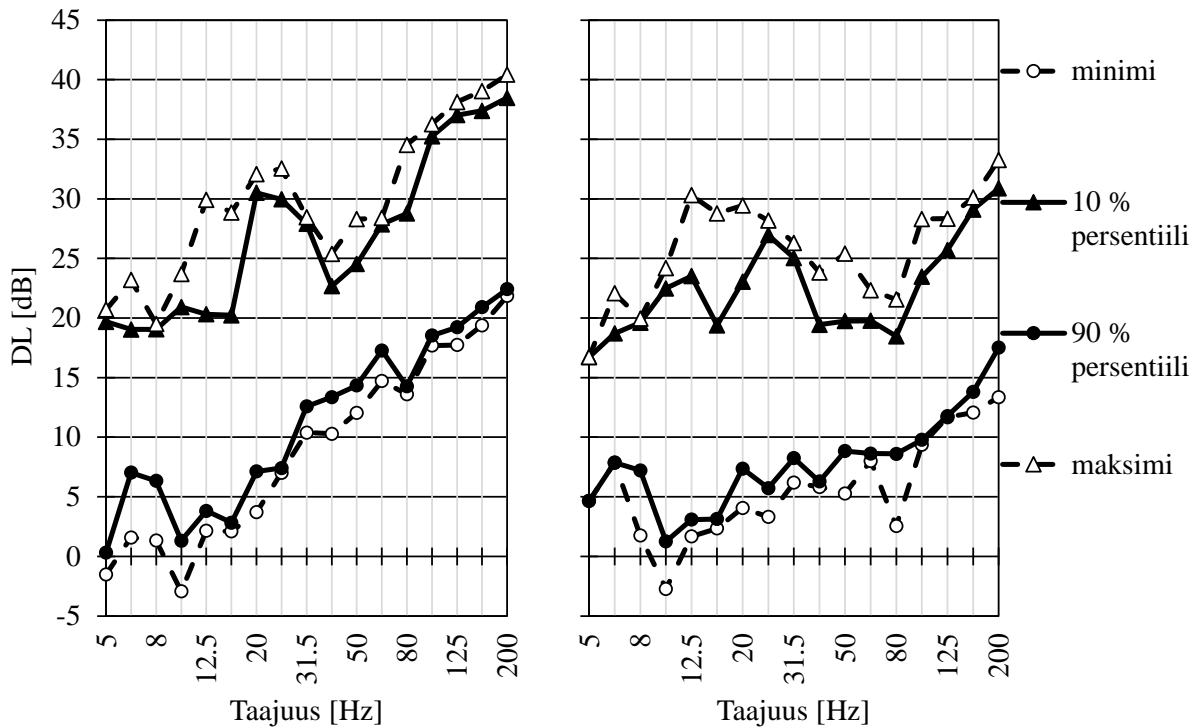
Yhtälössä (4) on valmiiksi huomioituna ympäristöministeriön ohjeiden mukainen korjaus -6 dB, jolla julkisivun pinnalla mitattu äänenpainetaso L_1 on valmiiksi korjattu oletettua vapaassa kentässä mitattua ympäristömelun arvoa vastaavaksi. Korjaus tehdään jo tässä vaiheessa, jotta mittaustuloksia DL voidaan sellaisenaan soveltaa sisätilojen äänenpainetasolaskelmissa (Taulukko 1).

DL -tulokset ryhmiteltiin erikseen nurkkapisteissä ja keskialueen pisteissä mitattuihin. Jokaisessa kohteessa nurkkapisteiden ja keskialueen pisteiden arvoista laskettiin erilliset arvot DL_N ja DL_K kullekin mitatulle julkisivulle. Mitatuista äänitasoeroista johdettiin tilastolliset estimaatit ilmaääneneristyskyvystä 10 % ja 90 % persentiileinä siten, että kaikista kohteista saadut terssikaista-arvot oli yhdistetty. Tuloksissa esitetyt käyrät eivät siis edusta yksittäisen rakennuksen mittaustulosta, toisin kuin kuvan 1 esimerkki.

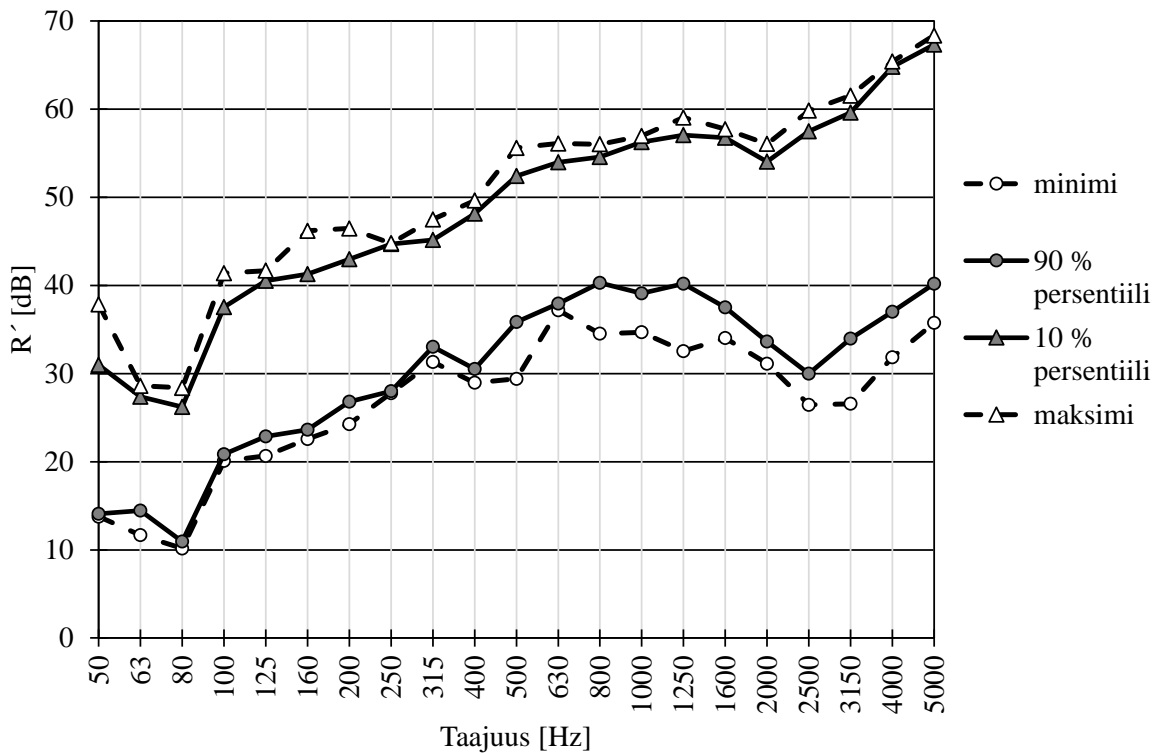
3. Tulokset

Ilmaääneneristävyys ja äänitasoero riippuivat taajuudesta, rakennusmateriaaleista, rakenteista, ikkunoiden pinta-alasta ja mittauspisteen sijainnista. Kuvan 1 tulos edustaa tavanomaista tulosta: nurkissa äänenpainetasot olivat seisovien aaltojen vuoksi jopa 10 dB suurempia kuin huoneen keskialueella 20–500 Hz (Kuva 1). Infraäänialueella mittauspisteen sijainnin vaikutus väheni, koska huoneet toimivat vakiopainekammiona.

Huoneen keskialueella ja nurkissa mitattu julkisivurakenteen tuottama äänitasoeron vaihteluväli esitetään kuvassa 2. Äänitasoero vaihteli 3–40 dB välillä taajuuksilla 20–200 Hz. Infraäänitaajuuksilla 5–16 Hz vaihteluväli oli -3 ... +30 dB. Ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan oli 31 ... 51 dB $R'_{45,w} + C_{tr}$. (Kuva 3).



Kuva 2. Huoneen keskialueella (vasen, DL_K) ja nurkissa (oikea, DL_N) mitattujen äänitasoerojen tuloksista määritetyt minimi- ja maksimiarvot sekä 10 % ja 90 % persentiiliarvot.



Kuva 3. Ilmääneneristävyyden tuloksista määritetyt minimi- ja maksimiarvot sekä 10 % ja 90 % persentiiliarvot.

4. Sovellusohje

Tuloksia on mielekästä hyödyntää Suomessa sisätilojen äänenpainetason laskelmissa pientaajuuksilla. Tällöin kyetään arvioimaan, ylittävätkö STM:n mukaiset ympäristömelun toimenpidearvot pientaajuuksilla [4].

Ympäristömelun äänenpainetaso $L_{eq,U}$ [dB] mallinnetaan pihamaalle 1/3-oktaaveittain tai se selvitetään mittauksin. Sisätilaan kuuluva äänenpainetaso $L_{eq,S}$ [dB] saadaan 1/3-oktaaveittain yhtälöllä

$$L_{eq,S} = L_{eq,U} - DL_{90} \quad (5)$$

missä DL_{90} [dB] edustaa tutkimuksessa määritettyä äänitasoeroa, joka ylittyy 90 % tapauksista suomalaisilla julkisivurakenteilla. Arvot on esitetty taulukossa 1. Ne perustuvat kuvan 2 mukaisten 90 % persenttiilarvoihin sovitettuun eksponentiaalifunktioon. Aineiston perusteella on mahdollista johtaa myös muita äänitasoeroja käytettäväksi yhtälössä (5) kuin tässä ehdotettu DL_{90} .

Taulukko 1. Julkisivurakenteiden tuottaman äänitasoeron vähimmäisarvon estimaatti, DL_{90} pientaajuuksilla 5 - 200 Hz.

f, Hz	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
DL_{90} , dB	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14

5. Kiitokset

Tutkimus tapahtuu ANOJANSSI –projektissa, jota rahoittavat mm. Tekes, Turun ammattikorkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö, Ympäristöpooli, Infra ry ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry.

Lähdeluettelo

- [1] ISO 16283-3:2016. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Façade sound insulation, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [2] ISO 140-5:1998. Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [3] ISO 717-1:2013. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [4] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545-2015 asunnon ja muun oleskelutilan olosuhteista. 23.4.2015, Helsinki. (<http://www.edilex.fi/saaduskokoelma/20150545.pdf>)

Kalkkisementtistabiloinnin teknistaloudellinen soveltuvuus liikennetärinän vaimennukseen

Timo Huhtala, Mikael Ruohonen ja Mikko Kylliäinen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy, akustiikkasuunnitteluyksikkö

Tiivistelmä

Pääradan varteen raideliikenteen tärinän riskialueelle on suunniteltu uusi asuinalue. Osana maankäytön suunnittelua on määritetty kustannustehokkaita vaihtoehtoja alueen suojaamiseksi tärinältä. Suunnittelun lopputuloksena on maaperään toteutettu stabilointirakenne, jolla vaimennetaan pehmeiden maakerrosten välityksellä rata-alueelta rakennuksiin kulkeutuvaa tärinää. Alueen tärinänvaimennuksen suunnittelusta on vastannut A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikkö ja stabilointirakenteen suunnittelusta sekä urakka-asiakirjojen laadinnasta on vastannut A-Insinöörien geosuunnitteluyksikkö. Alueen tärinäntorjuntaan liittyen on vuonna 2016 käynnistetty Liikenneviraston rahoittama tutkimus, jossa on kenttämittauksin selvitetty stabilointirakenteella saavutettava vaimennus. Tutkimuksessa on selvitetty myös stabilointirakenteesta otettujen näytteiden perusteella rakenteen loppulujuudet sekä määritetty toteutuneiden urakkakustannusten perusteella vaimennusrakenteen kustannus suhteessa rakennusoikeuteen. Tutkimushankkeen tulosten perusteella on saatu uutta tietoa teknistaloudellisesti parhaista alueellisista tärinäntorjuntamenetelmistä.

1. Johdanto

Viime vuosina rata-alueiden läheisyyteen on kaavoitettu paljon uutta rakennuskantaa erityisesti isoissa kasvukeskuksissa. Radanvarsialueiden houkuttelevuutta lisää joukkoliikenteen merkityksen kasvu sekä vapaiden maa-alueiden hupeneminen keskustoista. Näiden alueiden hyödyntämisen yksi tärkeä edellytys on, että melun- ja tärinäntorjuntaan on löydettävissä tehokkaita ratkaisuja, jotka eivät aiheuta kohtuuttomia kustannuksia kaavoituksesta vastaaville kunnille tai rakennusaikana hankkeisiin ryhtyville. Lopulta nämä kustannukset näkyvät toteutettujen tilojen neliöhinnossa loppukäyttäjälle. Liikennöitsijän sekä väylistä vastaavien tahojen osalta on tärkeää, että rataliikenne ei aiheuta häiriöitä läheisiin kiinteistöihin, koska tällöin häiriöiden vähentämiseksi saatetaan päätyä alentamaan ajonopeuksia. Meluntorjunnan osalta on viime aikaisissa tutkimuksissa haettu aluesuunnittelun näkökulmasta kustannustehokkaita ratkaisuja [1], mutta liikennetärinäntorjunnan osalta eri ratkaisujen kustannustehokkuutta ei ole juurikaan arvioitu.

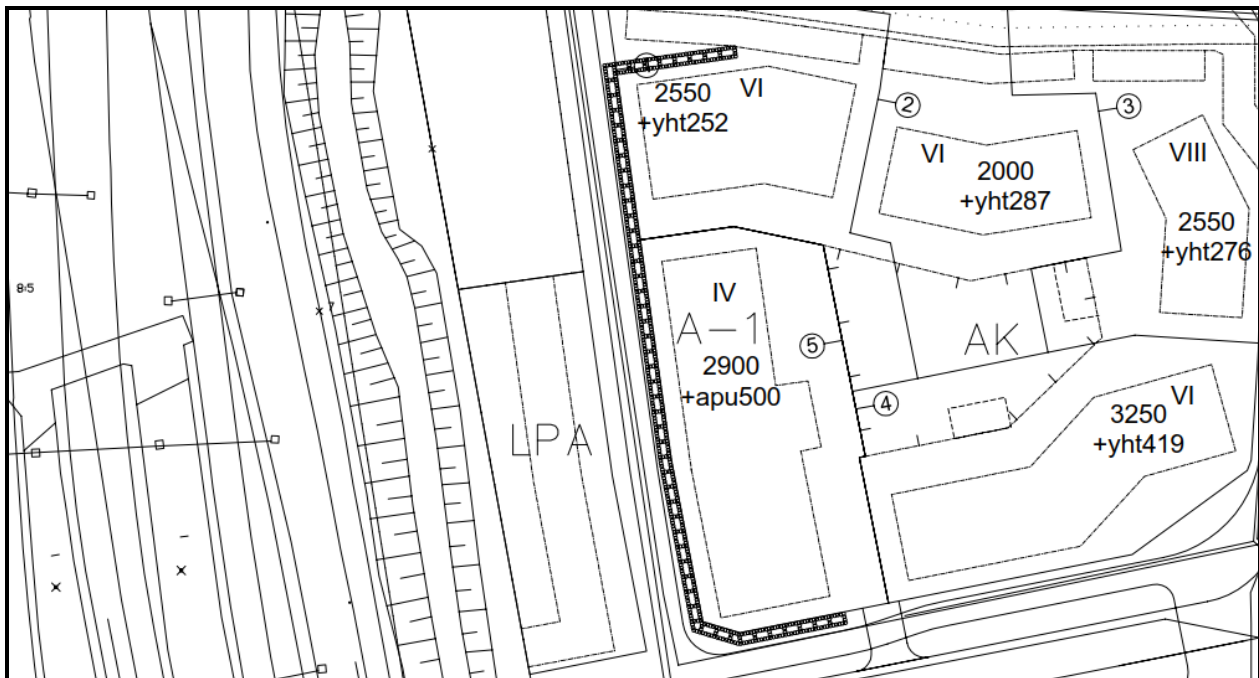
Raideliikenteen tärinä- ja runkomeluhaittoja pystytään alentamaan vaikuttamalla värähtelylähteeseen, siirtotiehen tai häiriintyvään kohteeseen [2]. Käyttökelpoiset keinot määräytyvät pitkälti sen mukaan mitkä toiminnoista ovat jo olemassa, kun uuttaa rataa tai rakentamista suunnitellaan. Olemassa olevien toimintojen osalta käyttökelpoisia keinoja on yleensä hyvin rajallisesti ja ne rajautuvat usein koskemaan siirtotietä.

Tässä tutkimushankkeessa rajoitutaan tarkastelemaan siirtotiehen eli maaperään toteutetun stabilointirakenteen vaikutusta uuden asuinalueen tärinäolosuhteisiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa on keskitytty pääasiassa vastaavien ratkaisujen teknisen toimivuuden arviointiin [3–5]. Näiden käyttökelpoisuus määräytyy kuitenkin pitkälti myös taloudellisten vaikutusten perusteella, joten tässä tutkimuksessa esitetään rinnalla myös toteutuneet kustannukset suhteessa kerrosneliömqmääriin.

2. Tutkimushanke

Suunnittelualue sijaitsee Etelä-Suomessa keskisuuren kaupungin keskustassa pääradan varressa. Kuvassa 1 on esitetty alueelle suunniteltu rakennuskanta, jonka mukaan alueelle tulee sijoittumaan yhteensä 13250 kerrosneliometriä asuntoja. Osana maankäytön suunnittelua teetettiin alueelle tärinä- ja runkomeluserveys, jonka tulosten perusteella alueelle suunniteltu asuinrakentaminen tulisi ylittämään suositukset ohjearvoiksi [6] tavanomaisella rakennustavalla toteutettuna. Jotta alueen toteuttamiselle olisi taloudelliset edellytykset, oli tarpeen löytää teknistaloudellisesti edullisin tapa tärinähaittojen torjuntaan. Kohteen reunaehtojen perusteella arvioitiin teknisesti soveltuvat vaihtoehdot tärinätorjunnan toteuttamisen osalta sekä määritettiin niiden taloudelliset vaikutukset.

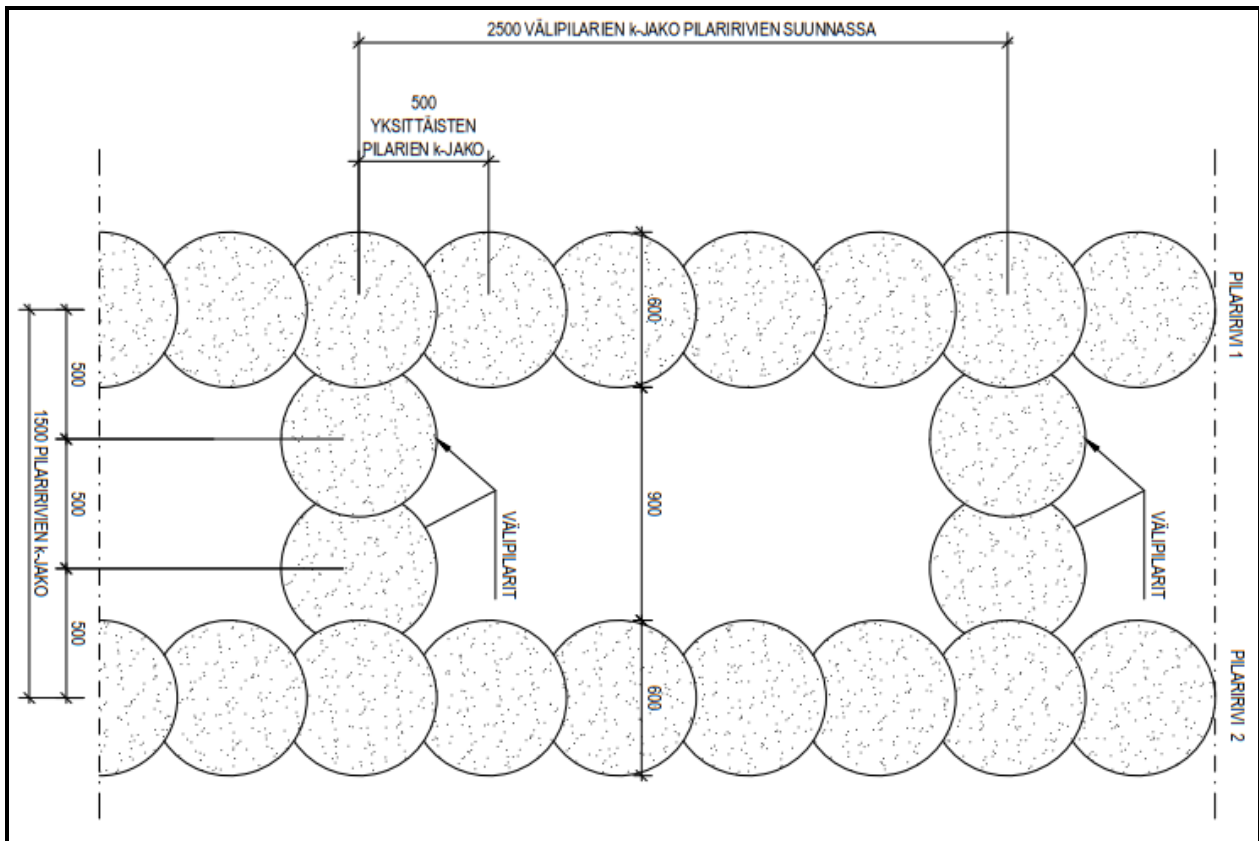
Selvitystyön tuloksena päätettiin maaperään toteuttaa kalkkisementtistabilointirakenne lähelle asuinrakennuksia. Kuvassa 1 on esitetty alueelle suunnitellun stabilointirakenteen sijainti suhteessa rataan ja suunniteltuihin rakennuksiin. Rataa lähimmät rakennukset ovat noin 65 metrin etäisyydellä lähimmästä raiteesta ja stabilointirakenne noin kolmen metrin etäisyydellä rataa lähimmästä rakennuksesta. Suomessa aikaisemmin toteutetut koerakenteet on pääosin sijoitettu lähelle rataa ja niiden vaimennuskyvyn on havaittu pienenevän etäisyyden kasvaessa vaimennusrakenteeseen nähden [3]. Tästä syystä oli tarpeen selvittää erillisen tutkimushankkeen puitteissa lähelle asuinrakennuksia sijoitettavan tärinätorjuntarakenteen vaimennuskyky lähimpien rakennusten osalta sekä vaimennusrakenteen kustannukset, jotta menetelmän vaikutukset aluesuunnitteluun pystytään paremmin arvioimaan tulevissa hankkeissa. Tutkimushankkeen rahoitti Liikennevirasto.



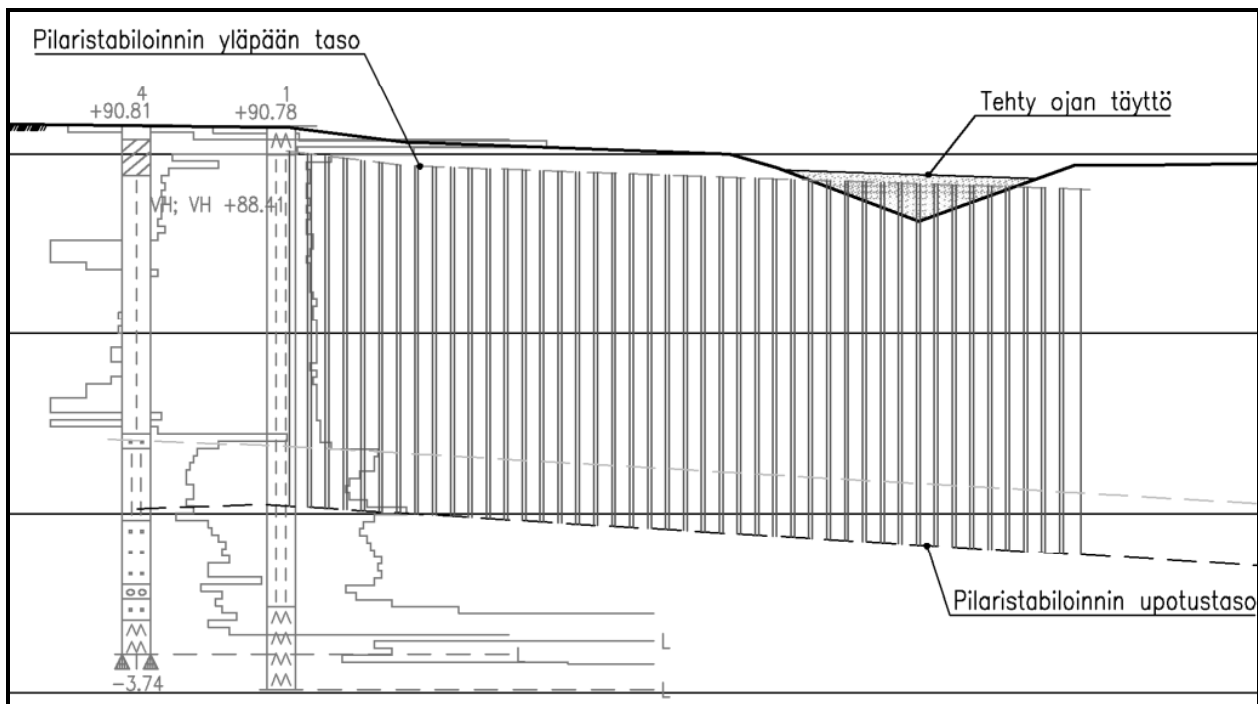
Kuva 1. Tutkimusalueelle rakennetaan 4–8-kerroksisia asuinrakennuksia, joihin sijoittuu yhteensä 13250 kerrosneliometriä asuintilaa sekä 1731 kerrosneliometriä yhteiskäyttöisiä tiloja sekä aputiloja. Stabilointirakenne kulkee rataa lähimpien rakennusten länsipuolella noin 100 metrin matkan ja kääntyy molemmissa päissä itään päin noin 25 metrin matkalle.

3. Tärinänvaimennusrakenne

Tärinänvaimennusrakenteen suunnittelusta on vastannut A-Insinöörien akustiikkasuunnitteluyksikkö ja stabilointirakenteen suunnittelusta sekä urakka-asiakirjojen laadinnasta on vastannut A-Insinöörien geosuunnitteluyksikkö. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty stabiloinnin toteutusperiaatteet. Kalkkisementtistabilointi on toteutettu 600 mm halkaisijaltaan olevilla pilareilla (k500), jotka muodostavat kaksi riviä (k1500). Pilaririvit on yhdistetty toisiinsa välipilarein 2,5 m välein. Rakenne on ulotettu pehmeiden maakerrosten läpi kovaan pohjaan asti. Maaperän muutoksista johtuen pilareiden pituudet vaihtelevat noin 8–13 m välillä. Suunnittelussa ja urakka-asiakirjoissa pilarien leikkauslujuudelle tavoitteeksi asetettiin 150 kPa.



Kuva 2. Pilarit sijoitettiin siten, että stabilointirakenne muodostuu kahdesta pituussuuntaisesta seinästä sekä niiden välisistä poikittaisista seinistä. Seinän pituussuunnassa pilariväli on 500 mm niin että vierekkäiset pilarit leikkaavat toisiaan 100 mm.



Kuva 3. Ote toteutetun stabilointirakenteen pituusleikkauksesta, jossa näkyy pilarien pituuden muutos maaperästä riippuen.

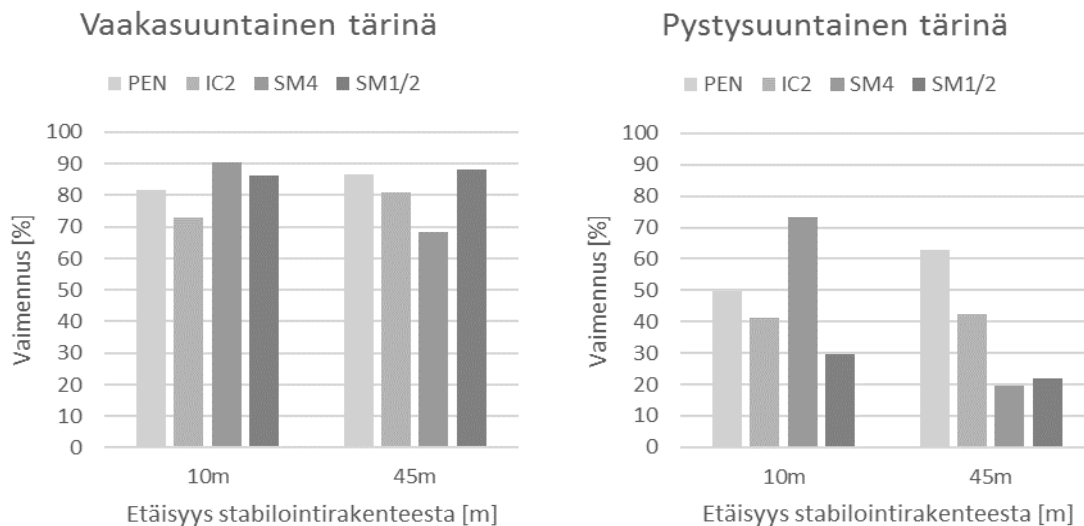
4. Mittaukset ja tulokset

Ennen urakkakyselyitä suoritettiin kustannuslaskenta, jonka perusteella stabilointirakenteen kokonaiskustannukseksi arvioitiin noin 83 800 €(0% alv) sisältäen työmaanjohto- ja tilaajatehtävät. Koko alueen asuinrakentamismäärään suhteutettuna vaimennusrakenteen kokonaiskustannus on siis noin 6,30 €/kem² (0% alv).

Pilarien toteutuneet lujuudet tutkittiin pilarikairauksin, puristinheijarikairauksin sekä pilarisiipikairauksin. Tutkittuja pilareita oli yhteensä 13 kappaletta ja ne olivat ehtineet kovettua koestushetkeen mennessä 21–29 vrk. Tutkimustulosten perusteella rakenne täytti toteutettuna sille asetetut suunnittelutavoitteet.

Ennen stabiloinnin rakentamista toteutettiin alueella maaperän värinämittaukset, joilla varmistettiin lähtötilanteen värinätasot halutuissa pisteissä myöhemmin toteutettavia vertailumittauksia varten. Lähtötilanteen mittaukset toteutettiin syksyllä 2016 kahdella mittauslinjalla. Stabilointirakenne toteutettiin loppuvuodesta 2016 ja keväällä 2017 rakenteen lujituttua ennen asuinrakennushankkeiden käynnistämistä suoritettiin vastaavilla mittauslinjoilla vertailumittaukset.

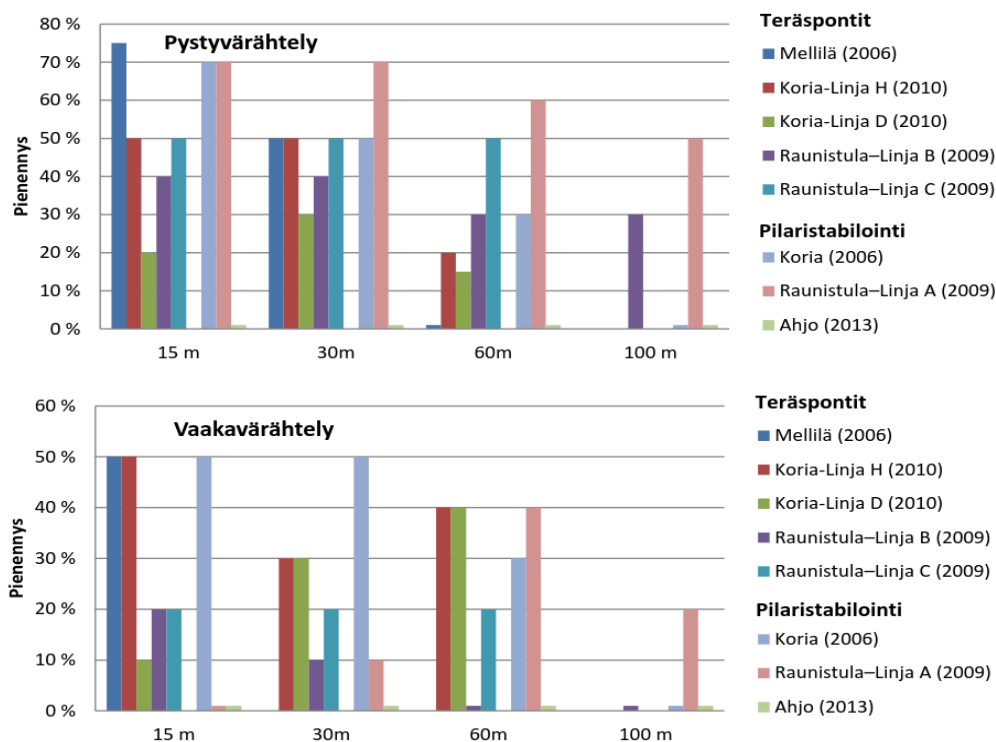
Kuvassa 4 on esitetty eri junatyyppien osalta määritetyt stabilointirakenteen vaimennukset kahdella eri etäisyydellä. Tulokset on laskettu VTT:n ohjeen [6] mukaisesti taajuuspainotetuista nopeussignaaleista määritettyjen tehollisarvon enimmäistasojen perusteella. Tulosten perusteella vaakasuuntainen värinä vaimeni sekä 10 m että 45 m etäisyydellä stabilointirakenteesta keskimäärin noin 80 % kaikkien matkustaja-junatyyppien perusteella laskettuna. Pystysuuntaan vastaava arvo oli 10 m etäisyydellä noin 50 % sekä 45 m etäisyydellä noin 40 %. Eri junatyyppien välillä havaittiin kuitenkin jonkin verran hajontaa etenkin pystysuuntaisen vaimennuksen osalta.



Kuva 4. Junatyypeittäin määritetty vaimennus stabilointirakenteelle 10 ja 45 m etäisyyksillä. Selitteet ja niitä vastaavat palkit ovat samassa järjestyksessä vasemmalta oikealle.

5. Tulosten tarkastelu

Aikaisemmissa tutkimuksissa VTT [3] on selvittänyt maaperään toteutettujen tärinätorjuntarakenteiden vaimennuskykyä teräsponttiseinien ja stabilointirakenteiden osalta. Kuvassa 5 on esitetty eri kohteissa tehtyjen mittaustulosten perusteella määritettyjä vaimennuksia vaaka- ja pystysuuntaiselle tärinälle.



Kuva 5. Yhteenveto tärinäesteiden vaikutuksista aikaisemmissa selvityksissä eri etäisyydellä radasta. Ahjon kohde on toteutetun vaimennusrakenteen ja maaperäolosuhteiden osalta jonkin verran muista poikkeava. Selitteet ylhäältä alas vastaavat kuvaajan palkkien järjestystä vasemmalta oikealle [3].

Tulosten perusteella on todettu, että eri rakenteilla heti esteiden takana pystyvärtelyyn pieneminen on ollut keskimäärin noin 40–50 % ja noin 60 m etäisyyksillä keskimääräinen vaimennus on ollut noin 20–30 %. Vaakasuuntaan vaimennus eri kohteiden välillä on vaihdellut huomattavasti. Joissakin tapauksissa vaimennus on ollut yli 50 % ja muutamissa vaimennusta ei ole ollut havaittavissa ollenkaan. Keskimääräinen vaimennus alle 60 m etäisyyksillä on ollut noin 20 % [3]. Pilaristabilointirakenteiden vaimennukset ovat olleet kahdessa kohteessa jonkin verran parempia kuin em. keskimääräiset vaimennukset kaikkien rakenteiden osalta.

Aikaisemmissa selvityksissä vaimennusrakenteet on toteutettu lähelle rataa noin 7–10 m etäisyydelle. Nyt toteutettu rakenne toteutettiin kauemmas radasta noin 60 m etäisyydelle ja lähelle suunniteltuja rakennuksia. Tulosten perusteella pystysuuntaisen tärinän osalta 10 m etäisyydellä saavutettiin keskimäärin noin 50 % vaimennus ja 45 m etäisyydellä noin 40 % vaimennus. Vaakasuuntaisen tärinän osalta vaimennus oli noin 80 % molemmilla etäisyyksillä. Pystysuuntainen vaimennus on siis samaa suuruusluokkaa kuin aiemmissa tutkimuksissa [3], mutta vaakasuuntaisen tärinän osalta saavutettiin jonkin verran aiemmissa tutkimuksissa mitattuja vaimennuksia parempi tulos.

6. Yhteenveto

Toteutettu stabilointirakenne saavutti tavoitelujuuden. Urakan toteutuneet kustannukset olivat ennakoarvion mukaiset, jolloin vaimennusrakenteen kustannusvaikutus alueen asuinrakentamisen osalta noin 6,30 €/kem². Ennen ja jälkeen tehtyjen maaperän tärinämittausten perusteella rakenteella saavutettiin pystysuuntaan 10 m etäisyydellä noin 50 % vaimennus ja 45 m etäisyydellä noin 40 % vaimennus. Vaakasuuntaisen tärinän osalta vaimennus oli molemmilla etäisyyksillä noin 80 %. Pystysuuntainen vaimennus oli samaa suuruusluokkaa aikaisemmissa tutkimuksissa saavutettujen vaimennusten kanssa, mutta vaakasuunnassa saavutettiin aiemmissa tutkimuksissa mitattua suurempi vaimennus. Kalkkisementtistabiloinnilla on mahdollista saavuttaa teknistaloudellisesti paras vaihtoehto alueellisen tärinän torjunnan kannalta. Tähän vaikuttaa kuitenkin oleellisesti alueelle suunniteltu rakennusmäärä sekä pehmeiden maalajien paksuus alueella.

Lähdeluettelo

- [1] Huhtala, T., Kylläinen, M. ja Takala, J. 2015. Meluntorjunta maankäytön suunnittelun lähtökohtana. Rakennusfysiikka seminaari 2015. Tampere, 22.10., Tampereen teknillinen yliopiston Rakennustekniikan laitos ja Rakennus-insinöörien liitto RIL Ry.
- [2] Huhtala T, Raideliikenteen tärinä- ja runkomeluselvityksiä sekä vaimennusratkaisuja. Akustiikkapäivät 2009. Vaasa, 14.-15.5., Akustinen Seura ry, s. 80-85.
- [3] Talja, A., Törnqvist, J. ja Niemeläinen, E. 2015. Pilaristabilointi- ja ponttiseinät: Tärinäestekokeilujen alustavat tulokset ja jatkotutkimustarpeet. Asiakasraportti VTT-CR-00691-15. Espoo: VTT.
- [4] Talja, A. et al. 2009. Tärinäesteet liikennetärinäna vaimentamisessa. Tutkimusraportti VTT-R-00963-09. Espoo: VTT.
- [5] Huhtala, T. ja Helimäki, H. 2010. Raideliikenteen tärinä ja runkomelu – vaimennusratkaisujen tehokkuus käytännössä. Tutkimusvaihe 3/3. Raportti 3777-4.
- [6] Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamista ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo: VTT.

Länsimetron runkomelu ja eristysratkaisut

Henri Penttinen, Timo Peltonen ja Timo Markula
Akukon Oy

Tiivistelmä

Raideliikenne aiheuttaa ympäristöönsä runkomelua, joka leviää kallioperässä esiintyvänä värähtelynä. Metroliikenteen aiheuttama runkomelualue voi ulottua noin 100 m etäisyydelle radasta. Länsimetron linja Helsingin Ruoholahdesta Espoon Kivenlahteen rakennetaan koko matkalta kalliotunneliin. Länsimetro rakennetaan keskelle nykyistä ja tulevaa kaupunkirakennetta, joten sen lähiympäristössä on satoja asuin-, koulu- ja toimistorakennuksia.

Runkomeluselvitykselle on tämän myötä ollut selvä tarve. Länsimetron suunnittelussa on käytetty laskennallista runkomelumallia, jonka avulla voidaan arvioida metroliikenteen ympäristöönsä aiheuttamat runkomeluhaitat. Mallin avulla radan eristysratkaisut voidaan mitoittaa ympäristön kohteiden asettamien vaatimusten mukaisesti.

Runkomelun tavoitetasot on asetettu kohde- ja rakennuskohtaisesti, ja runkomelun vaimennustarpeet rataosuuksille on selvitetty koko ratalinjan kattavien leviämismallilaskentojen avulla. Länsimetron lähes koko ratalinjaus eristetään runkomelun torjumiseksi. Ratarakenteisiin sijoitettava eristys on tehokas tapa vaimentaa rakennuksiin kytkeytyvää runkomelua. Radan runkomelueristyksellä on päästy lopputulokseen, jossa runkomelu ei häiritse nykyistä toimintaa ratalinjauksen ympäristössä.

1. Johdanto

Helsingin Ruoholahdesta Espoon Kivenlahteen ulottuvan Länsimetron metrolinjan pituus on noin 21 km, ja siihen tulee kolmesta uutta asemaa. Rata toteutetaan kokonaisuudessaan maan alle kallioon louhittuna. Rata sijoittuu kahteen rinnakkaiseen kalliotunneliin, jotka yhdistyvät asemien laiturihallien sekä radan raiteenvaihtopaikkojen kohdalla. Länsimetron jatke liittyy ensimmäiseen osaan Matinkylän ja Finnoon asemien välissä.



Kuva 1. Länsimetron linjaus ja asemat kartalla.

Länsimetron linjauksen yläpuolella ja välittömässä lähiympäristössä on satoja nykyisiä asuin-, koulu- ja toimistorakennuksia, jotka ovat alttiita metrolinjan runkomelulle. Radan ympäristössä on myös runkomelulle herkkiä erityiskohteita, kuten kirkkoja, kirjastoja, saleja ja muita kokoontumistiloja. Lisäksi Otaniemen ja Keilaniemen alueella on tieteellisessä käytössä olevia erikoistiloja ja tutkimuslaitteistoja, jotka ovat herkkiä runkomelulle tai erittäin vähäisellekin tärinälle. Näiden osalta tehtyä herkkien laitteiden tärinäselvitystä on kuvattu julkaisussa [1].

Tässä artikkelissa esitetään lyhyt kuvaus Länsimetron runkomeluselvityksestä ja kohteeseen suunnitelluista runkomelun torjuntaratkaisuksista. Runkoääniselvityksellä on haluttu varmistaa, että metrolinjan ei tule aiheuttamaan runkomeluhaittoja tulevan ratalinjan ympäristössä sijaitseviin nykyisiin tai kaavoitettuihin kohteisiin. Työhön on kuulunut runkomelun raja-arvojen selvitys, haitalle altistuvien alueiden ja kohteiden tunnistaminen, haittojen arviointi sekä tarvittavien torjuntatoimenpiteiden suunnittelu ja mitoitus.

2. Runkomelu ilmiönä

Runkomelu on pientaajuista melua, joka on seurausta kallioperän välityksellä rakennusrunkoon kytkeytyneestä värähtelystä. Huonetilojen rajapinnoissa esiintyvä värähtely on niin pientä, ettei sitä aistita tuntoaistin välityksellä tärinänä. Värähtelevät pintarakenteet säteilevät kuitenkin ääntä suurten kaiutinkalvojen tavoin, ja aiheuttavat tilaan korvin kuultavaa melua.

Raideliikenteen runkomelua esiintyy tyypillisesti noin 50–200 Hz taajuusalueella. Tätä pienemmillä taajuuksilla kuuloaistin herkkyys on niin pieni, ettei runkomelu yleensä aiheuta häiritsevää kuulohavaintoa. Suuremmilla taajuuksilla kallioperän häviöt puolestaan kasvavat jyrkästi.

3. Runkomelun leviäminen

Kalliotunnelissa kulkeva raideliikenne voi aiheuttaa runkomeluhaittoja tunnelin yläpuolelle ja lähiympäristöön. Kallioperä johtaa hyvin runkomelua, ja siinä etenevä värähtely vaimenee huomattavasti hitaammin kuin pehmeämmässä maaperässä. Runkomeluhaitat rajoittuvat yleensä noin 100 m etäisyydelle ratalinjauksesta alueilla, joissa rakennukset ovat kallioperustaisia. Jos rakennukset on perustettu maavaraisesti tai paalujen varaan ilman kalliokontaktia, runkomelu kytkeytyy rakennuksiin heikommin eikä runkomelualuetta välttämättä esiinny edes suoraan ratatunnelin yläpuolella. Vaihdealueilla runkomeluun liittyy myös kiskon epäjatkuvuuksista aiheutuvia kolahduksia. Näiden vaikutusalue jää kuitenkin paikalliseksi.

4. Runkomelun esiintymistiheys ja paikallinen vaihtelu

Runkomelua esiintyy vain hetkellisesti junan ohiajon aikana sen ohittaessa kohteen. Länsimetrolle suunniteltu liikennetiheys on kuitenkin varsin merkittävä; kahden minuutin vuorovälillä metron ohiajoja esiintyy joka minuutti, kun linjan molemmat suunnat huomioidaan. Nykyistä Helsingin metroa tiheämpi vuoroväli johtuu osaltaan siitä, että Länsimetron asemien käyttöönoton myötä metrojunat ovat vain kahden junayksikön mittaisia, kun nykyään Helsingissä liikennöidään myös kolmen yksikön pituisilla metrojunilla.

Yksittäisistä ohiajoista aiheutuviassa runkomelutasoissa esiintyy luonnostaan hajontaa riippuen mm. ajonopeudesta sekä kaluston pyörien ja rataosuuden kiskojen kunnosta. Runkomelutaso voi vaihdella myös eri puolilla samaa rakennusta johtuen kallioperän, etäisyyden ja maapohjan

vaihtelusta sekä rakennuksen perustamistavasta ja tilojen huoneakustiikasta. Näistä syistä mitoitusrajan luokkaa olevia runkomelutasoja esiintyy vain harvoissa huonetiloissa, ja niissäkin todennäköisesti vain osassa junien ohiajoista. Useimmissa tiloissa runkomelutasot jäävät selvästi alle mitoituksessa käytettyjen tavoitetasojen. Runkomelun syntymekanismeja, leviämistä ja häiriövaikutuksia on kuvattu myös julkaisuissa [2], [3] ja [4].

5. Runkomelun tavoitetasot

Suomessa ei toistaiseksi ole olemassa virallisia raja- tai ohjearvoja liikenteen aiheuttamalle runkomelulle. VTT on esiselvityksessään [4] esittänyt runkomelulle tavoitetasot, jotka vastaavat mm. Kehäradan tunneliosuuden ja Savion tunnelin suunnittelussa aiemmin käytettyjä tavoitetasoja [2 ja 3].

Länsimetron suunnittelussa käytetyt runkomelun tavoitetasot ovat VTT:n suosituksen kanssa yhteneväisiä, ja ne on esitetty taulukossa 1. Rataosuuksille tarvittava runkomelueristys on mitoitettu perustuen näiden tavoitetasojen täyttymiseen [4].

Taulukko 1. Länsimetron suunnittelussa käytetyt runkomelun tavoitetasot L_{ASmax} .

tilatyyppi	L_{ASmax} , dB enintään
herkät kohteet	20...25 dB
asunnot	30 dB
opetus- ja neuvottelutilat	35 dB
toimistot	40 dB

Meluerkissä erityistiloissa, kuten kirkoissa hyväksyttävät runkomelutasot on määritetty tapauskohtaisesti. Tavoitteena on ollut, ettei junan runkomelu aiheuta tilojen käytön kannalta merkittävää muutosta tilojen nykyiseen taustamelutasoon.

6. Runkomelun leviämisen arviointi

Runkomelun leviämistä on tarkasteltu laskennallisesti käyttäen Akukon Oy:n ja Vibkon Oy:n yhdessä kehittämää runkomelun laskentamallia [2]. Laskentamalli soveltuu metrojen, raitiovaunujen ja junien aiheuttaman runkomelun laskennalliseen arvioimiseen. Malli huomioi ratarakenteen ominaisuudet, kallioperän etäisyysvaimennuksen sekä kytkeytymisen kallioperästä maaperän ja perustusten välityksellä rakennukseen. Lisäksi tarkastelussa on huomioitu radalla liikennöivän kaluston pituus ja tyyppi sekä kohtaavien junien summautuva vaikutus. Mallia on Länsimetron ja Pisara-radon suunnittelun yhteydessä kehitetty edelleen. Matlab-ympäristössä tehtävä mallinnus mahdollistaa nykyään runkomeluerätteen leviämisen täyden kolmiulotteisen tarkastelun.

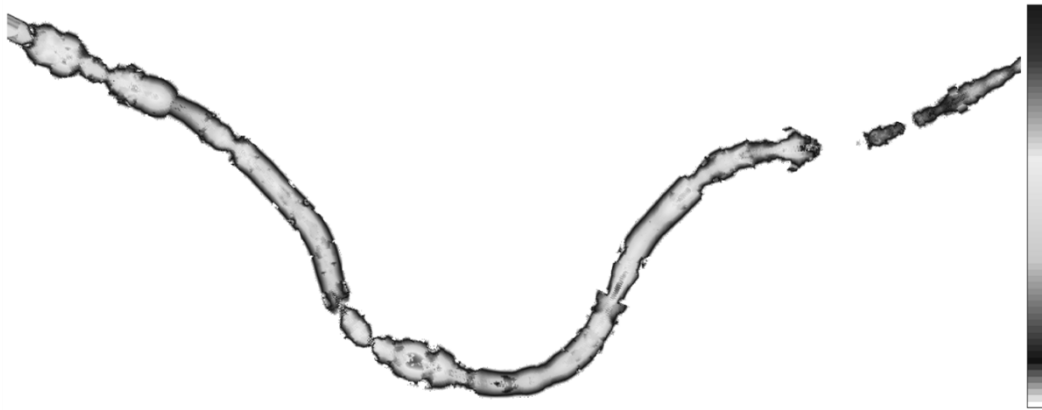
Runkomelualueiden laskennassa on käytetty myös mm. kalliopinta- ja maaperätietoja, rakennusten sijainti-, käyttötarkoitus- ja perustamistapatioja sekä kaavaehdotusten vaikutuksia.

7. Torjuntatarpeen arviointi

Runkomelun alueelliset torjuntatarpeet selvitettiin mallintamalla laskennallisesti runkomelun leviäminen ympäristöön. Laskenta aloitettiin selvittämällä ensin eristämättömän radan runkomelualueet ja kohdekohtaiset runkomelutasot. Kuvassa 2 on esimerkki tällä tavalla lasketuista runkomelutasoista ratalinjalla. Laskenta kuvaa rakennuksen alimmassa kerroksessa esiintyviä runkomelutasoja aluekohtaisesti. Mallinnus mahdollistaa sisätiloissa esiintyvien

runkomelutasojen ennakkoinnin myös niillä kohdin, joissa ei toistaiseksi ole rakennuksia. Tätä ominaisuutta hyödynnetään metrolinjan ympäristön maankäytön suunnittelussa ja runkomelun tulevien torjuntatarpeiden ennakkoinnissa.

Kaikki runkomelualueille sijoittuvat nykyiset rakennukset kartoitettiin koko metrolinjan osalta. Rakennukset listattiin ja niille osoitettiin niiden käyttötarkoitukseen perustuvat runkomelun tavoitetasot. Runkomelun rakennuskohtaiset torjuntatarpeet muodostettiin tämän jälkeen laskemalla maanpinnassa esiintyvät eristämättömän radan runkomelutasot kunkin rakennuksen kohdalle ja arvioimalla rakennuksen perustamistavasta ja mahdollisista kellari- tai pohjakerroksista aiheutuvan vaimennuksen vaikutukset.



Kuva 2. Esimerkki eristämättömän radan ympäristöön lasketuista runkomelualueista rataosuudella Espoon Finnoo - Kivenlahti.

8. Eristysten mitoitus

Radan eristystarve mitoitettiin tämän jälkeen raide- ja ratasegmenttikohtaisesti niin, että kaikkien altistuvien kohteiden runkomelutasot täyttävät tavoitearvot. Myöhemmin rakennettaviksi osoitetuilla alueilla mitoituksen lähtökohdaksi otettiin, että runkomelu ei ylitä asuintilojen suositusarvoja olettaen, että rakennusten perustukset on viety nykyiseen kallion pintaan asti. Eristysten sijoittelua ja eristysluokkien mitoitusta optimoitiin tässä yhteydessä laskennallisesti.

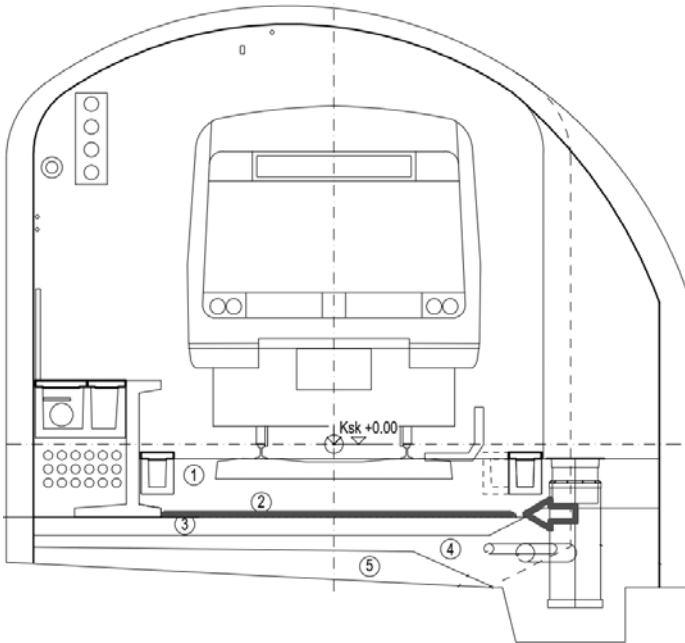
9. Eristysratkaisut

Eristysratkaisuna käytetään ratarakenteisiin sijoitettavia sepelinalusmattoja. Eristysten sijoitusperiaate on esitetty kuvassa 3. Eristykset on ratasuunnitelmavaiheen mitoituksessa jaettu kolmeen eri vaatimusluokkaan (10 dB, 13 dB ja 16 dB), jotka kuvaavat eristysmateriaalilla saavutettavaa lisäsvaimennusta radan ympäristössä esiintyviin runkomelutasoihin.

Länsimetron ratalinjaus eristetään lähes kauttaaltaan. Länsimetron molemmilla raiteilla on eristettävää rataa yhteensä yli 41 km. Eristysmateriaalia tarvitaan yli 160 000 m², josta 10 dB luokan eristystä on 66 %, 13 dB eristystä 31 % ja 16 dB eristystä noin 3 %. Eristysten suuren määrän vuoksi niiden materiaalikustannukset ovat joitakin miljoonia euroja.

Eristystuotteiden valmistajien tuotetiedoissaan ilmoittamat mitoitusarvot ja testaustulokset ovat lähtökohdiltaan ja oletuksiltaan vaihtelevia, eivätkä ne yleensä ole vertailukelpoisia keskenään. Tästä syystä eristeiden staattisille ja dynaamisille värähtelyteknisille ominaisuuksille muodostettiin Länsimetron ensimmäisen vaiheen suunnittelun yhteydessä eristysluokkakohtaiset numeeriset vaatimukset, jotka asetettiin osaksi materiaalien teknisiä hankintakriteerejä. Näiden

täytyminen varmistettiin edellyttämällä, että valmistajat testaavat tuotteensa kyseiset ominaisuudet standardin DIN 45673-5 [5] mukaisilla testeillä erikseen mainituissa riippumattomissa testauslaitoksissa. Eristemateriaalien staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia voidaan nykyään tarkistaa myös Vibkon Oy:n kehittämällä testauslaitteistolla. Tämä mahdollistaa tilaajalle myös työnaikaisen kolmannen osapuolen laadunvarmistuksen, sillä työmaalle toimitettavista eristysmateriaalieristä on voitu testata näytteitä myös pitkän rakennusprojektin aikana.



Kuva 3. Runkomelueristysmaton sijoitusperiaate ratatunnelin poikkileikkauksessa. Eristyskerroksen sijoituskohta on merkitty kuvaan nuolella.

10. Mittaus- ja mallinnustulosten vertailu

Länsimetron ensimmäisen vaiheen (Ruoholahti–Matinkylä) lähiympäristön rakennuksissa tehtyjen runkomelumittausten tulokset osoittavat, että runkomelumallinnus ja rataan asennetut eristysratkaisut toimivat kuten pitääkin. Mittauksia tehtiin vanhojen M100- ja uusien M300-metrojunien koeajojen aikana, kaikkia eristysmateriaaliluokkia edustavilla rataosuuksilla sekä radan ympäristön meluherkissä kohteissa.

Tulokset osoittavat runkomelun eristysmitoituksen ja eristeiden asennuksen onnistuneen, sillä mitatut runkomelutasot täyttävät ja alittavat kohdekohtaiset tavoitetasot. Rakennusten sisätiloissa mitatut runkomelutasot olivat kauttaaltaan jonkin verran pienempiä kuin runkomelun laskentamallilla kyseisiin kohteisiin arvioidut tasot. Tämä johtuu useasta osatekijästä: uudesta ja hyväkuntoisesta radasta, kallioperässä satunnaisesti esiintyvistä ruhjeista, rakennusten perustamistavoista sekä malliin sisällytetystä kohtaavat metrojunat huomioivasta varmuusvarasta. Eristyksessä on näin ollen tarvittava varmuusvara myös metroradan koko käyttöiän kannalta.

11. Yhteenveto

Länsimetron suunnittelussa on haluttu varmistaa, että metroliikenteen ei aiheuta runkomeluhaittoja ratalinjauksen ympäristössä. Suunnittelussa on käytetty laskentamallia, jonka avulla runkomelutasot voidaan arvioida alue- ja rakennuskohtaisesti ennen rakentamista.

Runkomeluselvityksen tarkastelussa on huomioitu sekä nykyiset että tulevat rakennukset ja kaava-alueet. Runkomelun tavoitetasot on asetettu kohde- ja rakennuskohtaisesti yli 500 rakennukselle, ja runkomelun vaimennustarpeet rataosuuksille on selvitetty koko ratalinjan kattavien leviämismallilaskentojen avulla.

Runkomelueristykselle on selvä tarve, ja lähes koko ratalinjaus eristetään. Ratarakenteisiin sijoitettava eristys jakautuu kolmeen eristysluokkaan, joilla eri rataosuuksille tarvittava eristys on optimoitu. Eristysmateriaaleja tarvitaan yhteensä yli 160 000 m².

Tehdyt mittaukset osoittavat, että runkomelueristeet ja mallinnus toimivat. Koeajojen aikana mitatut runkomelutasot täyttävät ja alittavat kohdekohtaiset tavoitetasot. Radan runkomelueristyksellä päästään lopputulokseen, jossa Länsimetron ratalinjauksen ympäristöön ei aiheudu runkomeluhaittoja.

Lähdeluettelo

- [1] Peltonen, T. Markula, T. Backholm, M. Metroliikenteen ja herkkien tutkimuslaitteiden tärinäselvitys. Akustiikkapäivät 2011, 11.-12.5.2011, Tampere.
- [2] Peltonen, T. Backholm, M. Raideliikenteen runkomelun mallintaminen ja arviointi. Akustiikkapäivät 2009, 14.-15.5.2009, Vaasa.
- [3] Peltonen, T. Backholm, M. Lahti, T. Raideliikenteen melu- ja tärinätutkimuksia. Akustiikkapäivät 2005, 26.-27.9.2005, Kuopio.
- [4] Talja, A. Saarinen, A. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys. VTT Tiedotteita 2468, Espoo 2009.
- [5] DIN 45673-5:2010. Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen – Teil 5: Labor-Prüfverfahren für Unterschottermatten. (Mechanical vibration - Resilient elements used in railway tracks - Part 5: Laboratory test procedures for under-ballast mats.).

B8. Huoneakustiikka

Avointen oppimisympäristöjen edellyttämät ääniolosuhteet

Mikko Kylliäinen ja Rauno Pääkkönen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Uusien opetussuunnitelmien myötä avoimet oppimisympäristöt ovat Suomessa yleistymässä oppilaitosten rakennushankkeissa. Määräyksiä, ohjeita tai vakiintuneita käytäntöjä niiden suunnittelemiseksi ei ole toistaiseksi olemassa eikä niiden akustisista olosuhteista ole Suomessa tehty laajempaa tieteellistä tutkimusta. Tämän tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää tutkimuskirjallisuuden perusteella, mitkä akustiset ilmiöt avoimissa oppimisympäristöissä ovat keskeisiä. Tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää huoneakustisin mittauksin, millaiset ovat ääniolosuhteet jo käyttöön otetuissa avoimissa oppimisympäristöissä. Tutkimuskirjallisuudessa keskeisenä akustisena ongelmana avoimissa oppimisympäristöissä pidetään opetusryhmien välisen yksityisyyden vähäisyyttä ja äänen leviämistä tilassa vapaasti eli vaatimatonta leviämismuunnosta. Syksyllä 2016 käyttöön otetuissa avoimissa oppimisympäristöissä tehdyt mittaukset osoittivat, että rakennuksen teknisten järjestelmien tuottama taustäänitaso on tavallisesti erittäin hiljainen. Suurimmat leviämismuunnoksen arvot mitattiin oppimisympäristössä, jossa oli eniten tilanjakajia. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että jälkikäiväntä-aika ei ole riittävä kriteeri avointen oppimisympäristöjen akustiikan suunnittelulle.

1. Johdanto

Uusien opetussuunnitelmien myötä avoimet oppimisympäristöt ovat Suomessa yleistymässä oppilaitosten uudis- ja korjausrakentamishankkeissa. Määräyksiä, ohjeita tai vakiintuneita käytäntöjä niiden suunnittelemiseksi ei ole toistaiseksi olemassa. Esimerkiksi Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1 vuodelta 1998 [1] ja standardi SFS 5907 rakennusten akustisesta luokituksista vuodelta 2004 [2] eivät tunne avoimia oppimisympäristöjä. Suomessa ei ole tehty tutkimusta avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteista äänen leviämisen ja häiritsevyyden kannalta, joskin tutkimustarve on tunnistettu [3].

Tämän tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää tutkimuskirjallisuuden perusteella, mitkä akustiset ilmiöt avoimissa oppimisympäristöissä ovat keskeisiä. Avoimia oppimisympäristöjä on rakennettu ulkomailla laajemmin 1960-luvulta lähtien [4], ja varsinkin nopeasti samalla vuosikymmenellä alkoi kritiikki avoimia oppimisympäristöjä kohtaan. Vaikka opetusmenetelmät muuttuivat, avointen oppimisympäristöjen akustiikka suunniteltiin luokkahuoneita vastaavaksi. Tästä seurasi ensinnäkin se, että koulupäivän aikana melutasot avoimissa oppimisympäristöissä olivat suuria. Toinen seuraus oli se, että ääni pääsi leviämään esteettä koko tilaan, jolloin se häiritsi keskittymistä edellyttävää työskentelyä. Tämä johtui siitä, että tiloissa oli liian pieni absorptioala ja niistä puuttuivat äänen leviämistä estävät tilanjakajat, kuten seinäkkeet ja riittävän korkeat ka-lusteet. [5–9]

Tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää akustisin mittauksin, millaiset ääniolosuhteet suomalaisissa avoimissa oppimisympäristöissä on saatu aikaan. Mittauksia tehtiin kolmessa syksyllä 2016 käyttöön otetussa koulussa. Tutkimuskirjallisuudessa esitettyjen havaintojen perusteella akustiset ilmiöt ovat samanlaisia kuin avoimistoissa, joissa pyritään rajoittamaan äänen leviämistä ja häiritsevyyttä suuren absorptioalan, seinäkkeiden ja peiteäänien avulla [10].

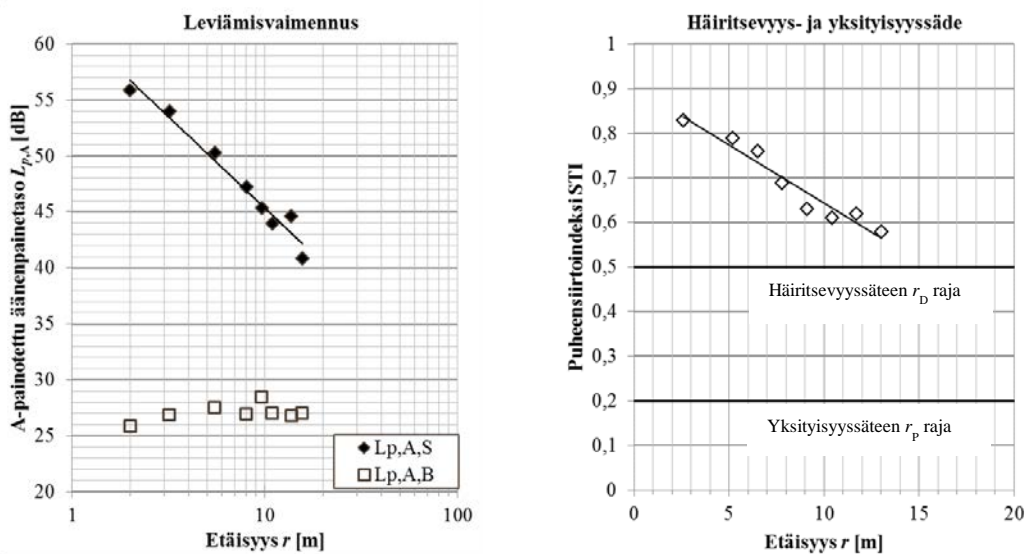
Koska avoimen oppimisympäristön akustiset ilmiöt ovat lähellä avotoimistoja, mittaukset tehtiin avotoimistojen akustiset mittaluvut ja niiden mittausten menetelmät määrittelevän standardin ISO 3382-3 [11] mukaisesti. Tutkimuksen sisältö on laajemmin raportoitu lähteessä [12].

2. Menetelmät

Akustiset mittaukset tehtiin kolmen koulun neljässä avoimessa oppimisympäristössä. Koulussa 2 mittauksia tehtiin kahdessa oppimisympäristössä, joista toinen (tila 2.1) avautui yhdeltä sivultaan koulun ruokalaan. Mittauksia tehtäessä koulujen käyttöönotosta oli kulunut muutama kuukausi, joten mittausten aikana kaikki irtokalusteet olivat paikallaan. Tutkittujen avointen oppimisympäristöjen pinta-alat olivat 177–230 m² ja huonekorkeudet 2,8–3,1 m. Tiloissa on noin 50–70 koululaista ja 2–5 opettajaa. Kirjoittajat tai heidän taustaorganisaationsa eivät olleet osallistuneet tutkittujen koulujen rakennushankkeisiin. Yhdessä kolmesta tutkitusta koulusta oli käytetty akustiikkasuunnittelijaa.

Yhdessä kouluista (koulu 1) koko lattia oli pinnoitettu tekstiilimatolla. Koulussa 2 lattianpäällysteenä oli muovimatto, koulussa 3 pääosalla lattia-alasta muovimatto ja pienellä osalla lattiasta tekstiilimatto. Koulussa 1 oli eniten tilaa jakavia elementtejä, kuten kalusteita ja verhoja. Koulussa 2 tilanjakajia ei ollut käytännössä lainkaan ja koulussa 3 niitä oli jonkin verran. Kaikissa tiloissa koko katon alalla oli tehokkaasti absorboivaa pinta.

Standardissa ISO 3382-3 [11] kuvattu mittausten menetelmä perustuu akustisten tunnuslukujen mittaamiseen eri etäisyyksillä äänilähteistä. Leviämismuutos $D_{2,S}$ [dB] lasketaan äänilähteestä tietyn mittauslinjan matkalla mitattujen puheen äänitasojen $L_{p,A,S}$ perusteella. Häiritsevyys säde r_D ja yksityisyys säde r_p määritetään mittaamalla puheensirtoindeksi STI arvoa eri etäisyyksillä äänilähteestä. Häiritsevyys säde vastaa etäisyyttä, jolla puheensirtoindeksi arvo on 0,5 ja yksityisyys säteen etäisyydellä puheensirtoindeksi arvo on 0,2. Puheensirtoindeksi laskentaa varten mitattiin taustäänitaso $L_{p,A,B}$ (kuva 1). Lisäksi mitattiin tilan jälkikaiunta-aika standardin ISO 3382-2 [13] mukaisesti.



Kuva 1. Esimerkki leviämismuutoksen $D_{2,S}$ sekä häiritsevyys säteen r_D ja yksityisyys säteen r_p määrittämisestä avoimessa oppimisympäristössä.

Kuvan 1 esimerkistä nähdään, että häiritsevyys säteen ja yksityisyys säteen rajana olevia

puheensiirtoindeksin STI arvoja 0,5 ja 0,2 ei tässä tilanteessa ole mittauslinjalla saavutettu. Tässä ja vastaavissa tilanteissa säteiden arvot on laskettu ekstrapoloimalla, jotta on saatu muihin mitattuihin avoimiin oppimisympäristöihin tai mittauslinjoihin nähden vertailukelpoinen tulos.

Peiteäänänen käyttöä avoimissa oppimisympäristöissä on ehdotettu jo 1970-luvulla [14]. Tarkoituksena on tällöin rajoittaa etäisyyttä, jolla puhe on hyvin erotettavissa ja vähentää siten sen häiritsevyyttä. Peiteäänänen vaikutusta häiritsevyyssäteiden arvoon tutkituissa avoimissa oppimisympäristöissä testattiin laskemalla puheensiirtoindeksien STI arvot myös laskennallisella peiteäänitasolla 40 dB [15].

3. Tulokset

3.1 Jälkikaiunta-aika ja taustaäänitasot

Tutkituissa avoimissa oppimisympäristöissä mitatut jälkikaiunta-ajat T_{20} on esitetty taulukossa 1 ja mitatut taustaäänitasot taulukossa 2. Koulun 2 avoin oppimisympäristö 1 avautui ruokalaan, minkä johdosta siinä oli muita oppimisympäristöjä jonkin verran suurempi taustaäänitaso.

Taulukko 1. Avoimissa oppimisympäristöissä mitatut jälkikaiunta-ajat T_{20} . Koulussa 2 mitatut kaksi oppimisympäristöä on merkitty numeroin 2.1 ja 2.2.

Tila	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Koulu 1	0,4 s	0,4 s	0,3 s	0,3 s	0,4 s	0,4 s
Koulu 2.1	0,5 s	0,5 s	0,4 s	0,5 s	0,6 s	0,7 s
Koulu 2.2	0,5 s	0,4 s	0,4 s	0,5 s	0,6 s	0,6 s
Koulu 3	0,5 s	0,5 s	0,4 s	0,4 s	0,5 s	0,5 s

Taulukko 2. Avoimissa oppimisympäristöissä mitatut taustaäänitasot.

Tila	Taustaäänitaso $L_{p,A,B}$
Koulu 1	25–34 dB
Koulu 2.1	34–40 dB
Koulu 2.2	24–30 dB
Koulu 3	24–32 dB

3.2 Leviämisvaimennus, häiritsevyyssäde ja puheensiirtoindeksi

Kussakin avoimessa oppimisympäristössä mitattiin leviämisvaimennus ja häiritsevyyssäteet tilan koosta ja muodosta riippuen 3–5 mittauslinjalla. Koulussa 1 keskellä oppimisympäristöä on pyöreä ala, joka voidaan sulkea verhoihin. Leviämisvaimennus ja häiritsevyyssäteet mitattiin tässä tilassa niin, että pyöreän alan verhot olivat auki ja kiinni.

Taulukossa 3 on esitetty mittaustulokset pisimmillä mittauslinjoilla. Taulukossa on lisäksi esitetty häiritsevyyssäteiden arvot, kun taustaäänänenä on käytetty laskennallista peiteäänitasoa 40 dB. Taulukossa 4 on esitetty häiritsevyyssäteiden muutos, kun taustaäänitaso $L_{p,A,B}$ vaihdetaan mitatusta laskennalliseen peiteäänitasoon. Tila 2.1 oli yhteydessä koulun ruokalaan, jolloin siellä taustaäänitaso oli suurin ja muutos siten pienin.

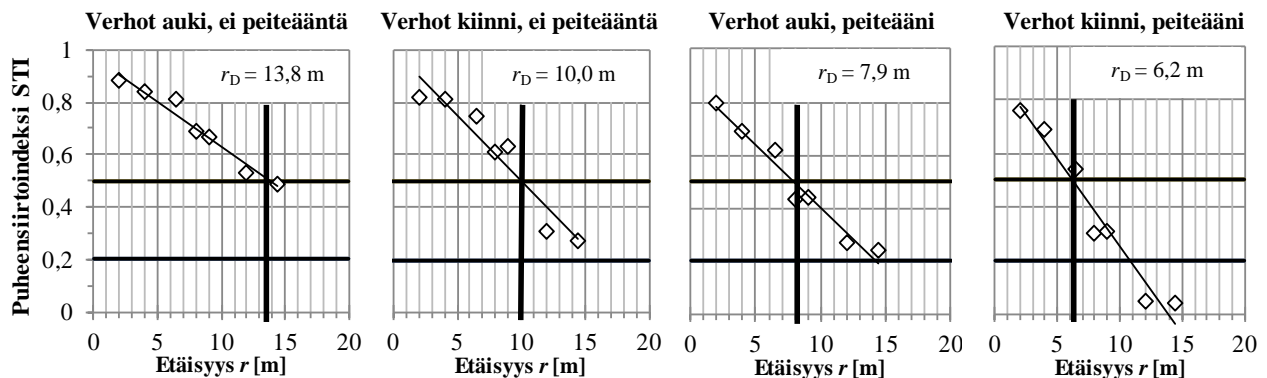
Taulukko 3. Avointen oppimisympäristöjen pisimmillä mitauslinjoilla mitatut tulokset, kun taustäänitasona on kussakin mitauspisteessä mitattu taustäänitaso (taulukko 2) tai laskennallinen peiteäänitaso 40 dB.

Tila	$D_{2,s}$	Mitattu $L_{p,A,B}$ (taulukko 2)		Laskennallinen $L_{p,A,B} = 40$ dB	
		r_D	r_P	r_D	r_P
Koulu 1	8 dB	14 m	23 m	8 m	14 m
Koulu 1, verhot kiinni	10 dB	10 m	16 m	6 m	11 m
Koulu 2.1	7 dB	8 m	16 m	8 m	15 m
Koulu 2.2	5 dB	16 m	27 m	9 m	16 m
Koulu 3	7 dB	16 m	27 m	8 m	15 m

Taulukko 4. Häiritsevyysäteiden r_D ja yksityisyysäteiden r_P muutos, kun taustäänitaso vaihtuu mitatusta (taulukko 2) laskennalliseen peiteäänitasoon 40 dB.

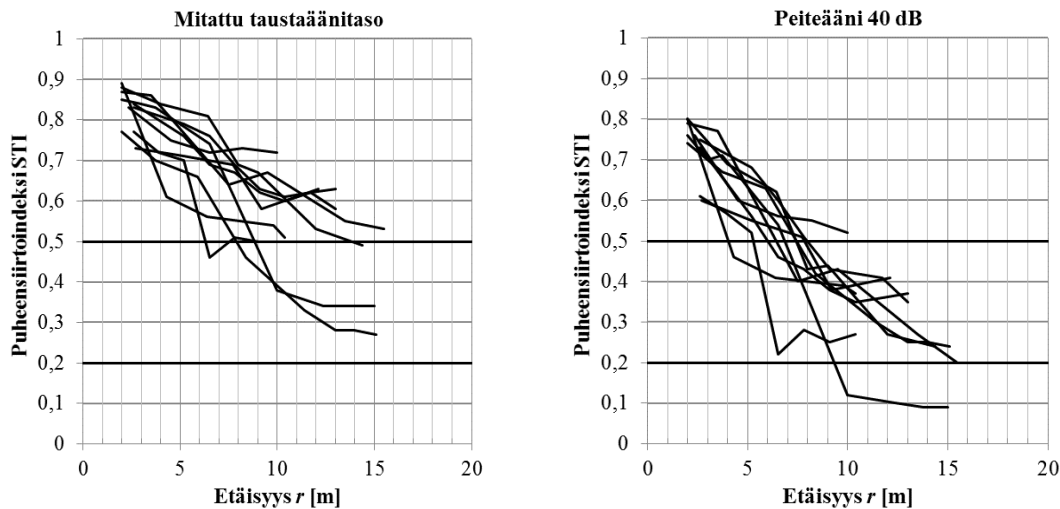
Tila	Häiritsevyysätteen muutos Δr_D	Yksityisyysätteen muutos Δr_P
Koulu 1	-6 m	-9 m
Koulu 1, verhot kiinni	-4 m	-5 m
Koulu 2.1	0 m	-1 m
Koulu 2.2	-7 m	-11 m
Koulu 3	-8 m	-12 m

Kuvassa 2 on esitetty häiritsevyysätteen r_D muutos koulun 1 avoimessa oppimisympäristössä, kun tilan keskellä olevan ympyränmuotoisen alueen verhot ovat kiinni tai auki ja peiteäänitaso on joko tilassa mitattu rakennuksen LVIS-järjestelmien tuottama melutaso tai laskennallinen 40 dB peiteäänitaso.



Kuva 2. Häiritsevyysätteen muutos koulussa 1, kun tilan keskellä olevat verhot ovat auki tai kiinni ja taustäänitasona on mitattu taustäänäni tai laskennallinen peiteäänäni 40 dB.

Puheen erotettavuuden tulee olla lähietäisyyksillä riittävä, kun opettaja puhuu samanaikaisesti koko ryhmälleen, jonka hän on koonnut ympärilleen. Tämä koskee myös tilannetta, jossa tilassa on peiteääni. Kuvassa 3 on esitetty puheensirtoindeksi STI arvon muutos yli 10 m pitkillä mitauslinjoilla etäisyyden suhteen, kun mitaustuloksiin on yhdistetty laskennallinen peiteäänitaso 40 dB sekä mitatuilla taustäänitasoilla.



Kuva 3. Puheensirtoindeksin STI arvo etäisyyden suhteen avointen oppimisympäristöjen yli 10 m ylittävillä mittalinjoilla, kun peiteäänitaso on mitattu tai laskennallinen 40 dB.

4. Tulosten tarkastelu

Mitatut jälkikaiunta-ajat olivat kaikissa tutkituissa avoimissa oppimisympäristöissä tasolla, jolla niiden tulisi ulkomaisten suunnitteluohjeiden perusteella olla [16]. Leviämismaimennuksen $D_{2,s}$ ja häiritsevyyssäteen r_D arvot olivat kuitenkin varsin vaatimattomia: käytännössä puhe on selvästi kuultavissa koko tilassa. Tämä johtuu siitä, että osassa oppimisympäristöistä ei juuri ollut tilanjakajia. Parhaat leviämismaimennuksen arvot mitattiin koulussa 1, jossa tilanjakajia oli eniten. Tutkituissa tiloissa oli erittäin hiljaista: taustäänitaso oli osin sama kuin asuinhuoneistojen taustäänitaso Suomessa on [17].

Luokkahuoneiden suunnittelussa vuosikymmeniä käytetty jälkikaiunta-aika [18] ei ole riittävä avointen oppimisympäristöjen suunnittelukriteeri. Lyhytkään jälkikaiunta-aika ja suuri absorptioala eivät takaa riittävän hyviä ääniolosuhteita avoimiin oppimisympäristöihin puheen häiritsevyyden kannalta. Ääniolosuhteisiin voidaan vaikuttaa tilanjakajilla, kuten verhoilla, seinäkkeillä ja kalusteilla. Peiteäänien merkitys näyttää olevan suuri. Tässä tutkimuksessa käytettiin peiteäänitasona $L_{p,A,B}$ 40 dB. Jatkotutkimuksilla tulisi selvittää, millainen avointen oppimisympäristöjen peiteäänien tulisi olla tasoltaan ja spektriltään.

Standardin SFS 5907 mukaan luokkahuoneissa puheensirtoindeksin STI tulisi akustisessa luokassa C olla vähintään 0,7 [2]. Kuvan 3 perusteella tämä arvo saavutettaisiin peiteäänintä käytettäessä useimmissa mittaustilanteissa 3–4 m etäisyydellä. Tämä riittänee etäisyydeksi, sillä avointen oppimisympäristöjen pedagogiikka ohjaa opettajia kokoamaan opetusryhmän lähelle, kun asioita on selvitettävä koko ryhmälle kerralla. Tarvittaessa opettajille voidaan järjestää pisteitä, joissa katossa on rajallinen ääntä heijastava pinta puheen heijastamiseksi lähietäisyyksillä.

5. Yhteenveto

Tutkimuskirjallisuudessa keskeisenä akustisena ongelmana avoimissa oppimisympäristöissä pidetään opetusryhmien välisen yksityisyyden vähäisyyttä ja äänen leviämistä tilassa vapaasti. Tehtyjen huoneakustisten mittausten tulokset osoittivat, että jälkikaiunta-aika ei ole riittävä avointen oppimisympäristöjen suunnittelukriteeri, vaan suunnittelun tulee perustua

puheenerotettavuuteen ja äänen leviämismuunnokseen. Mittaukset osoittivat myös, että taustäänitaso on yleensä erittäin hiljainen. Peiteääntä voidaan hyödyntää tehokkaasti rajoittamaan puheenerotettavuutta avoimissa oppimisympäristöissä.

Kiitokset

Kirjoittajat kiittävät Suomen Yliopistokiinteistöt Oy:tä, Saint-Gobain Finland Oy:n Ecophon-yksikköä, Audico Systems Oy:tä ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n akustiikkasuunnitteluyksikköä tutkimuksen rahoittamisesta sekä Olli Niemeä, Pauli Pallaskorpea ja Jyri Hiltusta miellyttävästä johtoryhmätyöskentelystä.

Lähdeluettelo

- [1] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksissa, ympäristöministeriö, Helsinki, 1998.
- [2] SFS 5907, Rakennusten akustinen luokitus, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2004.
- [3] Pääkkönen R, Vehviläinen T, Jokitulppo J, Niemi O, Nenonen S & Vinha J, Acoustics and new learning environment – A case study, *Applied Acoustics*, 100(2015), 74–78.
- [4] Shield B, Open plan schools: the acoustic challenges, 5th Symposium of the Finnish Society of Voice Ergonomics presentation, Helsinki, 9.9.2016.
- [5] King J, Sound of change in the American schoolhouse, *Sound*, 2(1963), 12–15.
- [6] Kingsbury H F & Taylor D W, Acoustical conditions in open-plan classrooms, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(1970), 79.
- [7] Sulewsky J E, Acoustics in office landscape and open-plan schools, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 48(1970), 99.
- [8] Schellenberg B, Noise and sound control in open plan schools, U. S. Department of Health, 1975. <http://www.eric.ed.gov/PDFS/ED109801.pdf>
- [9] Shield B, Greenland E & Dockrell J, Noise in open plan classrooms in primary schools: A review, *Noise & Health*, 12(2010), 225–234.
- [10] Keränen J, Measurement and prediction of the spatial decay of speech in open plan offices, Aalto University, School of Electrical Engineering, Doctoral Dissertations 23, Espoo, 2015.
- [11] ISO 3382-3, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices, International Organization for Standardization, Genève, 2012.
- [12] Saarelainen J, Avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteet, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma, diplomityö, Tampere, 2017.
- [13] ISO 3382-2, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, International Organization for Standardization, Genève, 2008.
- [14] Pirn R, The class circle – an acoustical design concept for open-plan schools, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1971), 97.
- [15] Hongisto V & Kylliäinen M, RIL 243-3-2008 Rakennusten akustinen suunnittelu: toimistot, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 2008.
- [16] Petersen C M & Rasmussen B, Acoustic design of open plan schools and comparison of requirements, Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Odense, June 18–20, 2012.
- [17] Takala J & Kylliäinen M, Room acoustics and background noise levels in furnished Finnish dwellings, Proceedings of the 42nd International Congress on Noise Control Engineering Internoise 2013, Innsbruck, September 15-18, 2013.
- [18] Kylliäinen M & Valovirta I, Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille, Akustiikkapäivät 2011, Tampere, 11.-12.5., 2011.

Osallistava melunhallinta ja akustointi – miten opetustilan ääniympäristöä voidaan parantaa?

Jaana Jokitulppo¹, Sirpa Pirilä², Elina Niemitalo-Haapola² ja Leena Rantala³

¹ A-Insinöörit Suunnittelu, Oulu

² Oulun yliopisto, Humanistinen tiedekunta, Logopedian tutkimusyksikkö

³ Tampereen yliopisto, Yhteiskuntatieteiden tiedekunta, Logopedia

Tiivistelmä

Tässä interventiotutkimuksessa tavoitteena oli vähentää oppituntien toiminnanaikaista melua parantamalla luokkien akustisia olosuhteita sekä toteuttamalla osallistavan melunhallinnan työpaja. Työpajatoiminnan avulla pyrittiin lisäämään oppilaiden ja opettajien tietoisuutta melusta, oman äänenkäytön ja toiminnan vaikutuksista oppitunnilla muodostuvaan meluun sekä toteuttaa oppilaiden ja opettajien kanssa yhdessä konkreettisia parannuksia havaittuihin epäkohtiin. Interventioiden jälkeen opettajat ja oppilaat kokivat luokan melutasojen ja äänimaailman muuttuneen parempaan suuntaan. Saatujen tulosten perusteella toteutetun sisältöistä työpajatoimintaa voidaan suositella opettajille ja oppilaille osaksi oppituntin aikaista melunhallintaa. Lisäksi vanhojen opetustilojen akustiset olosuhteet tulisi päivittää nykysuositusten tasolle.

1. Johdanto

Aiempien tutkimusten mukaan toiminnan aikainen melu oppitunnilla saattaa nousta niin korkeaksi, että se vaikuttaa epädullisesti sekä opettajan äänen hyvinvointiin että oppilaiden oppimiseen [1-3]. Opetuksen aikainen melutaso saattaa vaihdella tunnilla jopa 20 dB aktiviteetin mukaan [4]. Melun lisäksi huonot akustiset olosuhteet (mm. heikko puheen erotettavuus ja liiallinen kaikuisuus) ja esim. ilmanvaihtolaitteiden taustamelu sekä huono ilmanlaatu lisäävät opettajan tarvetta korottaa ääntä [5-6]. Näiden lisäksi ulkoa tai rakennuksen sisältä muualta tulevat äänet lisäävät taustamelua luokkahuoneissa, mikäli rakenteiden ääneneristävyys ei ole riittävä.

Opetustyön ja oppimisen onnistumiseen sekä opettajan äänen hyvinvointiin vaikuttavat keskeisesti em. tekijöiden lisäksi tiloja käyttävien henkilöiden lukumäärä sekä tilassa tapahtuva toiminta. Luokan kokonaisuusmelutasoon voidaan vaikuttaa tehokkaimmin, kun kaikki opetustilan käyttäjät tiedostavat osallisuutensa melun syntymisessä ja sen vähentämisessä. Aihetta on tutkittu toistaiseksi vielä vähän [7]. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko luokan toiminnanaikaisia melutasoja alentaa parantamalla luokan huoneakustisia olosuhteita. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, voidaanko työpajatoiminnan avulla lisätä oppilaiden ja opettajien tietoisuutta melusta, vaikuttaa oppilaiden rooliin toiminnanaikaisen melun synnyssä sekä auttaa oppilaita huomaamaan melulähteitä luokassa ja ideoimaan ja toteuttamaan niihin parannusehdotuksia. Tutkimustuloksia on aiemmin esitetty pro gradu-tutkielmassa [8].

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimuskohteet

Tutkimus toteutettiin Oulussa keväällä 2016. Tutkimuskohteiksi valittiin kaksi naisopettajaa luokkineen (kohteet A ja B) Naisopettajien äänen hyvinvointi -tutkimuksen aineistosta [9]. Kohde A:

yhdistetty 2.-3.lk., 15 oppilasta, rakennus valmistunut 1960-luvulla, luokan lattiapinta-ala 47 m².
Kohde B: 6. lk., 35 oppilasta, rakennus valmistunut 1990-luvulla, luokan lattiapinta-ala n.120 m².

2.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin keväällä 2016 kolmessa vaiheessa. I vaihe: lähtötilanne ja -kartoitus, II vaihe: interventio 1 (Int1), jolloin luokkiin lisättiin akustiikkalevyjä. III vaihe: interventio 2 (Int2), jolloin toteutettiin osallistavan melunhallinnan työpajat. Tutkimusaineisto kerättiin lähtötilanteessa sekä molempien interventioiden jälkeen.

2.2.1 Akustiset mittaukset ja interventio 1: akustiset muutokset

Kohteissa tehtiin mittaukset alkuvaiheessa ja intervention 1 jälkeen akustisten mittalukujen osalta. Huoneakustisissa mittauksissa määritettiin jälkikaiunta-aika T, oktaavikaistoittain 125–4000 Hz, puheensirtoindeksi STI ja puheen selvyys C₅₀ sekä taustäänitaso A-painotettuna keskiäänitasona L_{Aeq}. Mittaukset suoritettiin standardin ISO 3382 mukaisesti [10,11]. Lisäksi kohteissa mitattiin ilmaääneneristysluku R_w luokkatilan ja viereisen käytävän välillä standardien ISO 16283-1 ja ISO 717-1 [12,13] mukaisesti. Jokaisessa kolmessa vaiheessa mitattiin koko opetuspäivän ajan A-painotettuja yhden minuutin keskiäänitasoja L_{Aeq,1min} sekä A-painotettuja maksimitasoja (L_{Aeq,max,1,min}). Koko opetuspäivän aikainen L_{Aeq} ja L_{Amax} määritettiin laskennallisesti erikseen em. mittaluvuista. Mittaukset suoritettiin C1, 1998 mukaisesti [14].

Interventiossa 1 alkumittausten jälkeen luokkiin asennettiin akustiikkalevyjä akustiikkasuunnittelijan laatiman suunnitelman mukaan. Materiaalimäärien ja akustisten mittalukujen osalta noudatettiin standardin SFS5907 [15] suosituksia luokkatiloille.

2.2.2 Interventio 2: Osallistavan melunhallinnan työpaja

Melunhallinnan työpaja sisälsi kolme tapaamiskertaa, jolloin oppilaille kerrottiin melusta ja sen vaikutuksista. Lisäksi tehtiin puheenerottelun ja -tuottamisen harjoituksia melussa, ohjattiin havainnoimaan melunlähteitä luokassa ja omassa toiminnassa sekä miettimään niihin melua vähentäviä ratkaisuja, jotka lopuksi toteutettiin (mm. huoneentaulu, penaaliparkki, tuolien huopatassut).

2.2.3 Kyselyt

Interventioiden vaikutusten arvioimiseksi sekä opettajilta (7 kysymystä) että oppilailta (12 kysymystä) kerättiin tietoa kokemuksista luokkatilan ääniympäristöstä kyselyillä kussakin vaiheessa I-III. Kyselyissä tiedusteltiin mm. eri äänilähteiden häiritsevyyttä sekä opettajan puheen kuuluvutta ja erotettavuutta luokassa. Vastaukset annettiin 10 cm pituiselle Vas-janalle (visual analogical scale, janan asteikon tulkinta: 0=ei vaikeuksia/ei häiritse; 10=suuria vaikeuksia/erittäin häiritsevä).

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Akustiset mittaukset ja melumittaukset

Akustisten mittausten ja toiminnanaikaisten melumittausten tulokset on esitetty taulukossa 1. Toiminnanaikaisten melumittausten tulokset molemmissa kohteissa olivat keskimäärin koko opetuspäivän ajalta A-painotettuna keskiäänitasona alkutilanteessa 65 dB, L_{Aeq,1min} -vaihtelun ollessa 34–85 dB. Akustoinnin jälkeen tasot pienenivät kohteessa A 2 dB, ja kohteessa B 1 dB

(taulukko 1). Mediaaneissa tasoero oli kuitenkin suurempi kohteessa A, sillä alkutilanteen mediaani oli 60 dB, joka interventioiden jälkeen aleni 4–5 dB. Kohteessa B erotus oli 1 dB.

Taulukko 1. Akustiset mittaluvut, niiden ohjearvot sekä toiminnanaikaisten melumittausten tulokset kohteissa A ja B lähtötilanteessa (Alku) sekä ennen ja jälkeen interventioita Int1 (akustiikkalevyt) ja Int2 (työpajat).

Mittaluku	Kohde A			Kohde B		
	Alku	Int1	Int2	Alku	Int1	Int2
Toiminnanaikainen melu, dB						
L_{Aeq}	65	63	63	65	64	64
L_{Aeq} , mediaani	60	55	56	58	57	57
L_{Aeq} , vaihtelu	36–85	32–85	31–90	35–84	33–80	36–82
L_{Amax}	89	91	99	90	83	90
L_{Amax} mediaani	65	60	61	63	62	62
Taustamelutaso						
L_{Aeq}	35		31**	28**,35		34
L_{Amax} , dB	39		-	37		34
Ohjearvo* L_{Aeq}/L_{Amax} , dB	≤33/38		≤33	≤33/38		≤33
STI	0,70	0,76		0,73	0,74	
Ohjearvo*	≥ 0,7	≥ 0,7		≥ 0,7	≥ 0,7	
Ilmaääneneristysluku, R'_{w} , dB	30			31		
Ohjearvo*	34			34		

*SFS5907 mukaan, **Ilmanvaihto pois päältä.

Tilojen taustamelutasot (LVIS-laitteiden aiheuttama) olivat molemmissa luokkatiloissa $L_{Aeq,1min}$ 35 dB, mikä oli 2 dB yli ohjearvon. Luokkatilojen ja käytävän väliset ilmaääneneristävyyssluvut R'_{w} olivat 30 dB (A) ja 31 dB (B), joista kumpikaan ei täyttänyt ohjearvoa. Kummassakaan tilassa myöskään ovien ääneneristys ei ollut riittävä. Lopputilanteessa ei tapahtunut muutosta taustamelutasossa eikä ilmaääneneristävyydessä, koska näiden osalta ei tehty korjaavia toimenpiteitä.

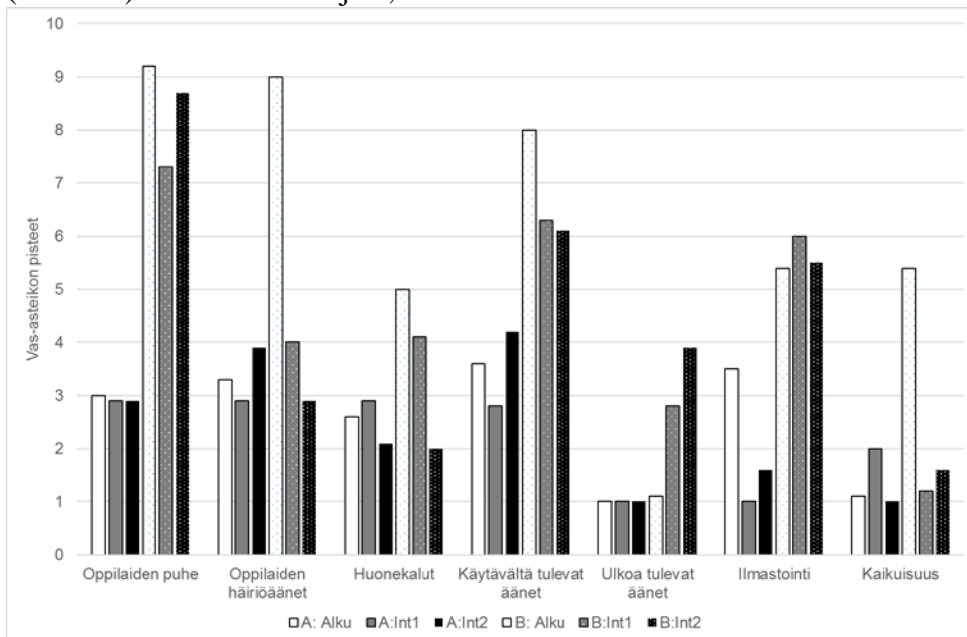
Luokkatilojen jälkikaiunta-ajat vaihtelivat alkumittauksissa kohteessa A taajuusalueella 125–4000 Hz 0,5–1,0 s ja intervention 1 jälkeen 0,4–0,7 s. Kohteen B alkutilanteessa jälkikaiunta-aika vaihteli em. taajuuksilla 0,4–0,7 s ja lopputilanteessa 0,4–0,5 s, kun ohjearvo 125 Hz taajuudella on enintään 0,9 s ja taajuusalueella 250–4000 Hz enintään 0,6 s. Puheen selvyyttä (C_{50}) kuvaavat mittaluvut vaihtelivat taajuusalueella 125–4000 Hz alkutilanteessa kohteessa A 2,7–6,6 ja kohteessa B 3,8–10,8. Intervention jälkeen vastaavat arvot olivat kohteessa A 6–8,7 ja kohteessa B 4,4–11,6, kun tavoitearvot olivat 125 Hz taajuudella vähintään 3, ja muilla taajuuksilla vähintään 6. Sekä jälkikaiunta-aika että puheen selvyys täyttivät ohjearvot akustoinnin jälkeen. Puheensiirtindeksi oli jo alkutilanteessa ohjearvon mukainen kohteessa B, mutta parani akustoinnin jälkeen lisää.

3.2 Kyselyjen tulokset

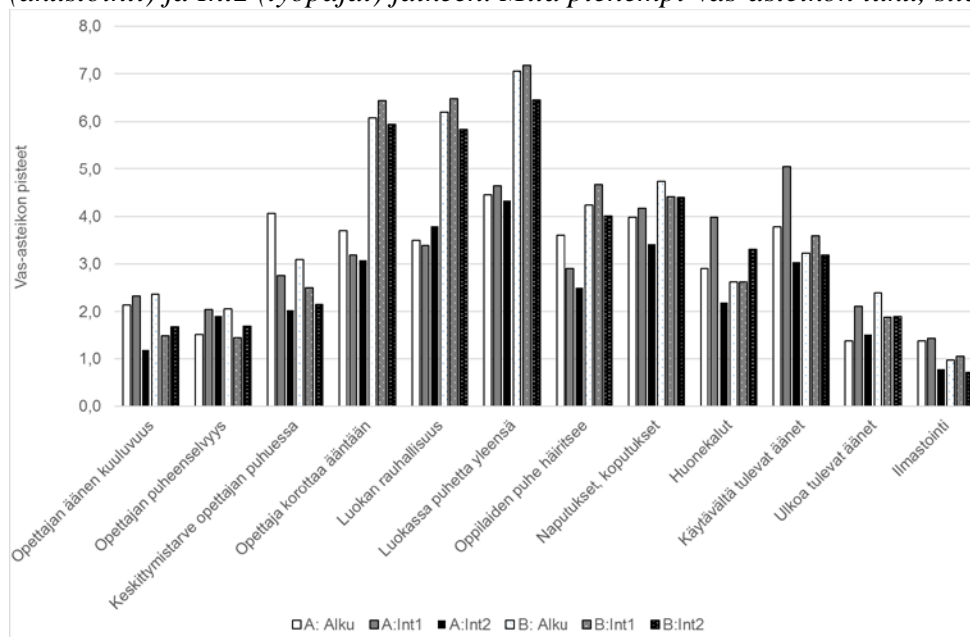
Opettajien ja oppilaiden kyselyjen tulokset on esitetty kuvissa 1–3. Opettaja A:ta häiritsivät eniten oppilaiden häiriöäänät, käytävältä tulevat äänet ja ilmastoinnin äänet. Opettajaa B:ta häiritsivät eniten oppilaiden puhe, oppilaiden aiheuttamat häiriöäänät ja käytävältä tulevat äänet (kuva 1). Oppilaita häiritsivät eniten toisten oppilaiden puhe, naputukset ja käytävän äänet (kuva 2).

Interventioiden jälkeen suurimmat muutokset tapahtuivat opettajalla B käytävältä tulevien häiriöäänien ja tilan kaikuisuuden kokemisessa. Myös huonekaluista lähtevien äänien häiritsevyys pieneni molemmilla opettajilla merkittävästi Int2:n jälkeen (kuva 1). Opettaja B:n kohdalla tapahtui suuri muutos interventioiden jälkeen myös oppilaiden aiheuttamien häiriöäänien suhteen: ne

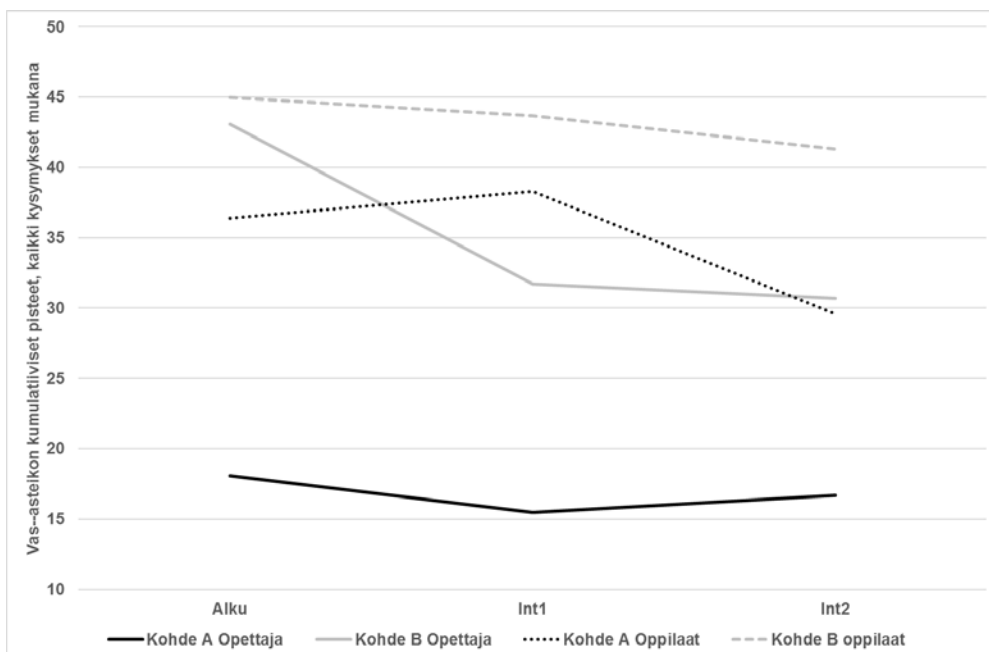
häiritsivät paljon vähemmän interventioiden jälkeen. Oppilaiden mielestä opettajan puheäänen kuuluvuus ja selvyys paranivat interventioiden jälkeen. Myös opettajan puheeseen keskittyminen parani. Toisten oppilaiden puhe ei myöskään häirinyt yhtä paljon interventioiden jälkeen kuin ennen niitä. Sitä vastoin käytävältä ja ulkoa tulevat äänet häiritsivät enemmän interventioiden jälkeen (kuva 2). Tulokset ovat samansuuntaisia sekä oppilailla että opettajilla. Molemmat opettajat sekä oppilaat kokivat luokan ääniympäristön parantuneen kokonaisuudessaan tutkimuksen edetessä. Vanhemmat oppilaat (B) kokivat ääniympäristön parantuneen hieman sekä akustoinnin että työpajojen jälkeen. Nuoremmat oppilaat (A) kokivat tilanteen akustoinnin jälkeen hieman huonommaksi, mutta työpajojen jälkeen selvästi paremmaksi (kuva 3). Opettajien mielipide kouluarvosanoin luokan ääniympäristöstä parani alkutilanteen arvoista 8 (kohde A) ja 6 (kohde B) arvosanoihin 9 ja 8,5.



Kuva 1. Opettajien A ja B kokemukset äänten häiritsevyydestä lähtötilanteessa (Alku) ja Int1 (akustointi) ja Int2 (työpajat) jälkeen. Mitä pienempi Vas-asteikon luku, sitä parempi tilanne.



Kuva 2. Oppilaiden kokemusten keskiarvot opettajan äänestä ja äänten häiritsevyydestä lähtötilanteessa (Alku) ja Int1 (akustointi) ja Int2 (työpajat) jälkeen. Mitä pienempi Vas-asteikon luku, sitä parempi tilanne.



Kuva 3. Kaikkien kysymysten kumulatiiviset Vas-pistemäärät: lähtötilanne (Alku), Int1 (akustointi) ja Int2 (työpajat). Kysymysten määrä: oppilaat 12, opettajat 7. Mitä pienempi Vas-asteikon luku, sitä parempi tilanne.

4. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa huoneakustiikan, ääneneristävyyden tai LVIS-laitteiden aiheuttaman taustamelutason SFS5907 ohjearvot eivät täyttäneet alkuvaiheessa. Akustiikkalevyjen asennuksen jälkeen huoneakustiset mittaluvut täyttivät vaatimukset. Taustäänitaso (ilmastointilaitteista) ja ilmaääneneristävyys eivät täyttäneet vaatimuksia interventioiden jälkeenkään, koska korjaavia toimenpiteitä ei tehty.

Toiminnanaikainen A-painotettu keskiäänitaso ja sen mediaani laskivat kohteessa A akustoinnin jälkeen ja pysyivät samalla tasolla työpajojen jälkeen. Suuntaus näkyi myös maksimitasojen mediaaniluvuissa. Sen sijaan kohteessa B toiminnanaikaisessa keskiäänitasossa ei tapahtunut selvää muutosta kummankaan intervention jälkeen, vaikka suuntaus oli aleneva. Tähän on voinut vaikuttaa kohteesta B saatu suppea aineisto (lyhyempi mittausaika), luokan suurempi oppilasmäärä sekä luokan parempi huoneakustinen lähtötaso kohteeseen A verrattuna.

Koska aineisto oli pieni, tuloksia ei voida yleistää. Kohteet poikkesivat toisistaan oppilasmäärän, iän, luokan pinta-alan sekä opettajien yksilöllisten erojen vuoksi. Luotettavamman kuvan saamiseksi tulisi seurata toiminnan aikaista melutasoa ajallisesti kauemmin ja useampana päivänä. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat kuitenkin, että toteutetun kaltaisella osallistavalla ja työpajamaisella toiminnalla voidaan vaikuttaa luokan ääniympäristöön ja parantaa oppimista tukevia olosuhteita, mikä mahdollisesti tukee myös opettajan työhyvinvointia. Merkittävä osuus on myös tilojen akustisilla olosuhteilla ja niiden saattamisella suositusten mukaiselle tasolle. Melun vähentäminen on siis oikeasti merkityksellistä ja mahdollista - pieninkin muutoksin voidaan saada vaikutusta aikaan.

Lähdeluettelo

- [1] Sala E, Rantala L: Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland. *Appl Acoust* 2016;114:252-259.
- [2] Kristiansen J, Lund SP, Persson R, Shibuya H, Nielsen PM, Scholz M: A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. *Int Arch Occup Environ Health* 2014;1-10.
- [3] Lyberg Åhlander V, Haake M, Brannstrom J, Schotz S, Sahlen B: Does the speaker's voice quality influence children's performance on a language comprehension test? *Int J Speech Lang Pathol* 2015;17:63-73.
- [4] Shield, B. & Dockrell, J. (2004). External and internal noise surveys of London primary schools. *Journal of the American Statistical Association*, 115, 730–738.
- [5] Neuman AC, Wroblewski M, Hajicek J, Rubinstein A. Combined effects of noise and reverberation on speech recognition performance of normal-hearing children and adults. *Ear Hear* 2010;31:336–44.
- [6] Sala, E. & Rantala, L. (2012). Opetustilojen akustiikka ja ääniergonomia – tutkimuksesta toteutukseen. Loppuraportti. Työsuojelurahaston hanke nro 109292.
- [7] Becker, M., Caminiti, S., Fiorella, D., Francis, L., Gravino, P., Haklay, M., Tria, F. (2013). Awareness and learning in participatory noise sensing. *PloS one*, 8, 12.
- [8] Lehto H, Leskelä V. Opettajan äänenkuormitus ja melunhallinta luokassa. Pro Gradu. Oulun yliopisto, Humanistinen tiedekunta, Logopedian tutkimusyksikkö, 2017.
- [9] Pirilä S, Pirilä P, Ansamaa T, Yliherva A, Samuel Sonning S, Rantala L. Correlations between activity noise, voice parameters and voice symptoms of female teachers during lessons in core subjects.(Submitted) 2017.
- [10] SFS-EN ISO 3382-2. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- [11] SFS-EN ISO 3382-3. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices. 2012. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- [12] SFS-EN ISO 16283-1:2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- [13] SFS-EN ISO 717-1. Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. 2013. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- [14] Suomen rakentamismääräyskokoelma C1. Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Ympäristöministeriö. Helsinki 4.6.1998.
- [15] SFS 5907:2004. Rakennusten akustinen luokitus. 2004. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Kalusteet osana tilan akustista ratkaisua

Rauno Pääkkönen ja Mikko Kylliäinen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Tampere

Tiivistelmä

Akustisia kalusteita ovat esimerkiksi sermit, erotustilat, väistötilat, ”puhelinkopit”, korkeaselkäiset tai pehmustetut tuoliratkaisut sekä tuolien tassuratkaisut, joita on toimistomaisissa tiloissa tai oppimisympäristöissä. Kalusteiden osalta on nähtävissä ratkaisuja, joilla pyritään vaimentamaan tilan kaikuisuutta. Korkeaselkäisten tuoliratkaisujen suhteen nähdään äänen leviämisen katkaisuun tähtäävää toimintaa. Samoin avotoimistojen yksityisyyden lisäämiseksi on syntynyt erotustilaratkaisuja ja äänierioita, missä äänen eristävyys on tavoitteena. Akustisissa kalusteissakin on vielä kehiteltävää mm. pöytien, kirjahyllyjen, tietokoneiden näyttöjen ja vaatenaulakoiden osalta. Erilaisten mattojen käyttö akustiikan parantamiseksi voisi nykyisestään kehittyä, jolloin liikuttaisiin akustisten pöytämattojen ja seinävaatteiden suuntaan. Sähköakustisista ratkaisuista on esillä ollut lähinnä peiteäänien käyttö ja useimmiten koko tilan diffuusi taustäänitason lisääminen. Osa-alueiden äänikentän käsittely ei ole yleistä, kuten osakattoratkaisut äänikentän suhteen tai taustääntä lähettävät verhot, palkit tai muut rakenneratkaisut. On esitetty myös ajatuksia esimerkiksi vastameluun perustuvista sänkyjen pään puolen akustisista ratkaisuista.

1. Johdanto

Akustiikan suunnittelussa kalusteilla on oma osuutensa, vaikka tilan kaiuntaisuus, seinä-, lattia- ja kattorakenteet saavatkin suurimman huomion [1–2]. Kalusteilla on mahdollista vaikuttaa tilan absorptioalaan, äänen leviämiseen, äänen eristämiseen (äänilähde tai kuuntelu) sekä viestinnän laatuun. Kirjallisuutta ja tuote-esitteitä aiheesta on Suomestakin löydettävissä [3]. Akustisina kalusteina on käytetty huonekaluja, kirjahyllyjä, sermejä, äänierioita, vaatenaulakoita. Ajatusta on mahdollista laajentaa pesäkalusteisiin ja peiteäänijärjestelmiin [4–5] kuten avoimissa oppimisympäristöissä ja monitilatoimistoissa.

Ihmisen absorptioalaksi arvioidaan eri lähteissä $0,2\text{--}0,6\text{ m}^2$, joten voisi ajatella, että tavallisten pienten huonekalujen kuten pöydän ja tuolin absorptioalan tulisi olla samaa luokkaa. Absorptioala on summa tilassa olevien materiaalien absorptiosuhteiden ja niiden pinta-alojen tuloista. Kalusteiden absorption lisääminen on perusteltua myös siksi, että kalusteet ovat usein lähellä ihmistä, jolle absorptiosta on hyötyä.

Monesti tuolin vetäminen lattiassa aiheuttaa värähtelyä ja edelleen ääntä, mikä häiritsee kouluissa, ravintoloissa, ruokaloissa ja niin edelleen. Tämän värähtelyn vähentämiseen liittyviä ratkaisuja on myös kehitetty, mutta lisää kehitystyötä tarvittaisiin.

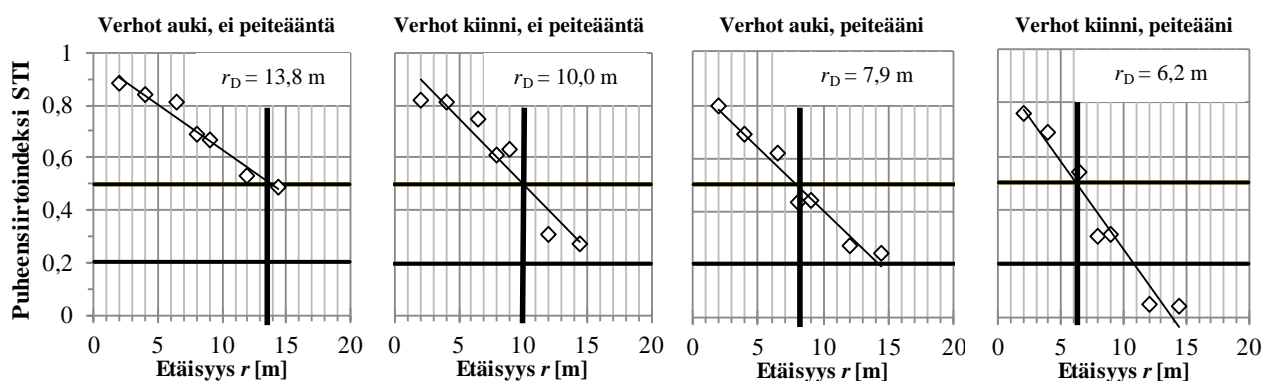
Oleellinen asia kalusteisiin liittyen on viestintä ja sen onnistuminen. Teollisuustiloissa kalusteiden merkitys tässä suhteessa ei ole merkittävä, mutta toimistoissa ja oppimisympäristöissä viestinnän merkitys korostuu. Pääsääntöisesti kehitetyt akustiset kalusteet ovat olleet passiivisia eli niiden avulla tilojen absorptioalaa on lisätty tai tehty ääntä erottavia rakenteita. On kuitenkin mahdollista rakentaa akustisia järjestelmiä, missä tietyn osa-alueen akustointia muutetaan sähköakustiikalla

kuten peittoäänellä tai rajatuilla ääniratkaisuilla. Myös kalusteet voisivat olla tässä mielessä aktiivisia eli ne voisivat lähettää peittoääntä tai vastamelua, joiden avulla käyttäjän viestintää voitaisiin parantaa ja äänien häiritsevyyttä vähentää. Tähän ajatteluun perustuvia kuulokkeita käytetään jo melko yleisesti avotoimistoissa.

Tämän työn tarkoituksena on koota ajatuksia olemassa olevista akustisista kalusteista sekä samalla pohtia kehittämisenäkökuja uusille ratkaisuille. Tämä tehdään sen takia, että saataisiin näkemys siitä, että akustiset kalusteet ovat tavallisia varsinkin toimisto- ja oppimisympäristössä, mutta on vielä monia käyttökelpoisia ideoita, millä tilojen akustiikkaa voidaan kalustelähtöisesti parantaa.

2. Esimerkkejä akustisista kalusteista ja niiden vaikutuksista

Avoimessa oppimisympäristössä tarvitaan tilanjakajia. Tilanjakajat voivat olla myös seinäkkeitä tai kalusteita kevyempiä ratkaisuja, kuten verhoja. Verhoilla on oltava absorptiokykyä ja jonkin verran ääneneristävyyttä (kuva 1). Peiteääni on keskeinen tekijä, kun taustäänitaso on alhainen. Lähteessä [4] on osoitettu, että peiteäänitasolla 40 dB saavutettiin pienillä etäisyyksillä riittävä puheenerotettavuus ja suurilla etäisyyksillä riittävä puheenpeitto. Jos tilan äänitaso on 30 dB, kunkin puhujan ääni on selvästi kuultavissa koko tilassa.



Kuva 1. Verhojen ja samanaikaisen peiteäänien vaikutus puheen erotettavuuteen ($STI = \text{speech transmission index}$, puheensirtoindeksi) eri etäisyyksillä äänilähteestä, kun tilassa olevat verhot ovat joko kiinni tai auki ja taustäänin äänitaso on joko LVIS-järjestelmien tuottama 25–34 dB tai peiteäänijärjestelmän tuottama 40 dB [4]. Puheensirtoindeksin STI arvo 0,2 kuvaa yksityisyysäädettä ja 0,5 häiritsevyyssäädettä.

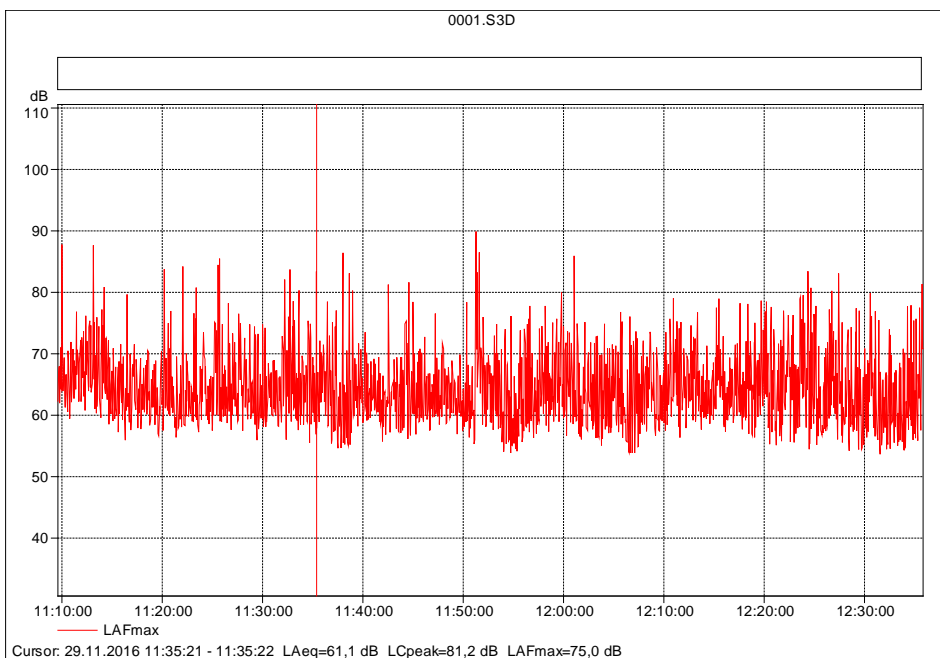
Kuvassa 2 on esimerkki avoimesta oppimisympäristöstä, missä on käytetty erilaisia mahdollisuuksia akustoida tilaa kalusteilla. Kuvassa näkyvät akustiset verhoilut huonekaluissa, verhot, ilmoitustaulut, korkeaselkäiset istuimet sekä jakkarat. Luonnollisesti katon absorboiva verhous pitää myös toteuttaa, sillä kalusteet eivät korvaa katon absorptiota.

Nykyään kalustevalmistajilla on hyviä äänierioitä, joten esimerkiksi puhelinkoppi ideana on tullut uudestaan avotoimistoihin. Tämä mahdollistaa toisia työntekijöitä häiritsemättömien neuvottelujen pitämisen etänä esimerkiksi puhelimen tai Skypen avustuksella. Pienissä äänierioissa saattavat kuitenkin ilmastointi, valaistus, istuinten ergonomia ja muut sisäilmastotekijät nousta tärkeiksi suureiksi, jotta niissä pystyttäisiin työskentelemään tehokkaasti.



Kuva 2. Avoimen oppimisympäristön akustisia ratkaisuja. Kuvassa näkyy myös runsaasti ääntä vaimentavia pintoja, kuten katto, kalusteet, verhot ja lattian tekstiilimatto. Valokuva: Jaana Jokitulppo.

Ruokalatilasta mitattu hetkellinen äänitaso $L_{AF,max}$ on kuvassa 3. Lähes jokainen kuvassa näkyvä piikki on tuolin liikuttelusta aiheutunut, missä tuolin jalkaa vedettiin muovimatolla. Asian ratkaisemiseksi pohdittiin lattian vahausta, mutta päädyttiin kokeilemaan tuolitassuja [6].



Kuva 3. Ruokalan ääniympäristö, missä keskiäänitaso oli 65 dB mittausajalta ja huipputasot alle 105 dB. F-aikavakiolla mitatut äänitasojen suurimmat arvot olivat 70–90 dB, mihin vaikuttaa tuolin siirtotapa ja tuolin etäisyys mikrofonista.

3. Ajatuksia kehitysnäkymistä

Akustiikkaa on mahdollista kehittää kalusteisiin monella tavalla. Esimerkiksi jos pöydän yläpinta täytyy pitää sileänä ja kovana, pöydän alapintaan tai sivupintoihin voidaan tehdä akustisia vaimennuksia. Kalusteisiin voitaneen lukea myös taulut ja posterit, jotka vaimentavat ääntä (kuva 4). Riittävän suurikokoisilla tauluilla saadaan myös absorptioalaa tilaan.

Kalusteissa akustisen materiaalin mekaaninen kestävyys voi olla ongelma. Teollisuuden puolella käytetyt suojauskeinot kuten reikälevy ja verkot eivät ole sopivia toimistoihin. Siksi sopivat kankaat lienevät paras vaihtoehto. Varmaan kangasmateriaaleja voisi kehittää tässä suhteessa. Esimerkkinä eräästä hankkeesta oli avoauton kangaskaton kehittäminen sellaiseksi, että se eristää tehokkaasti ulkoa tulevaa ääntä, ei aiheuta uusia virtausääniä sekä sisäpinnaltaan vaimentaa ohjaamossa olevia ääniä.



Kuva 4. Neuvottelutilan seinässä oleva akustinen valokuva.

Äänikenttien ohjaamiseen liittyviä ratkaisuja on vähän. Tästä ovat esimerkkinä jo parikymmentä vuotta sitten rakennetut ravintoloiden äänikatot pienten tanssilattioiden yläpuolelle, joista ei kuitenkaan muodostunut menestystekijää.

Jossakin vaiheessa pohdittiin laivojen sänkyjen pään kohdalle vastamelujärjestelmiä, joilla olisi pystytty vaimentamaan laivan moottoreiden ja liikkumisen aiheuttamia ääniä. Mahdollista olisi myös toimistotyöhön rakentaa vastamelujärjestelmiä, mutta tällä hetkellä ne tulevat selvästi kalliimmiksi kuin vastamelukuulokkeet.

Absorptiota on vielä mahdollista lisätä tiloihin, esimerkiksi suuren näytön takapintaa voidaan absorboida ja maisemoida, absorboivia kirjahyllyjä voidaan käyttää paljon enemmän

tilanjakajina, korkeita tuolin selkämyksiä voisi olla paljon enemmän ja niin edelleen. Vain mielikuvitus asettaa rajoja mahdollisuuksille.

Toisaalta täytyy koko ajan miettiä sovelluksen merkitystä. Jos ajatellaan, että kalusteilla saadaan lisättyä absorptioalaa suurehkoissa tilassa 100 m², sama lisäys voidaan helposti saada lisäämällä noin 100 m² absorptiomateriaalia tilan kattoon tai seinille. Sen sijaan viestinnän näkökulmasta toteutetut seinäkkeet, tilanjakajat, verhot ja muut äänen leviämistä estävät kalusteet saattavat ratkaista esiintyviä ongelmia.

Kannattaa myös muistaa sähköakustiset mahdollisuudet kalusteratkaisuissa. Esimerkiksi kohinageneraattori ja kaiutin pöytään rakennettuna eivät ole välttämättä kallis ratkaisu ja se voidaan myös yhdistää näyttöpöytteen ja kuulokkeiden äänimaailmaan.

4. Yhteenveto

Tavallisesti akustisilla kalusteilla tarkoitetaan kalusteiden ominaisuuksia, jotka on saavutettu kiinnittämällä kalusteiden pinnalle ääntä imevää materiaalia. Pitää kuitenkin muistaa, että kalusteita ja verhoja voi käyttää tilanjakajina, jolloin äänen leviäminen estyy tai vaikeutuu. Mahdollisuuksia kalusteiden kehittämiseen ääniteknisesti olisi myös monia, kuten sähköakustiset ratkaisut, ergonomian ja akustiikan yhdistäminen, tilojen osa-akustoinnit ja monet muut ajatukset.

Lähdeluettelo

- [1] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S. 2015. Akustiikka ja uusi oppimisympäristö. Kirjassa Nenonen, S., Kärnä, S., Junnonen, J. M. & al (toim.). Oppiva kampus. Suomen Yliopistokiinteistöt Oy, Tampere, 182–195.
- [2] Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S. & Vinha, J. 2015. Acoustics and new learning environment—a case study. *Applied Acoustics* 100(2015), 74–78.
- [3] Linkkejä: hakusanat: akustiset kalusteet, akustiset huonekalut, acoustical furniture
http://www.akustiikka-shop.com/?gclid=Cj0KEQiAhZPDBRCz642XqYOCpb8BEiQANUcwT6mP-2Zcp0yjIGxPQosEgDxdsEVWjiq86KyRkhi_FQcaAvH48P8HAQ
<http://www.martela.fi/silence-ratkaisut>
<http://intoconcept.com/fi/news/acoustics-study-into-furniture-effectively-reduces-office-noise-pollution/>
<http://www.akustiikkapalvelut.fi/akustiikkatuotteet/kalustetassut>
<http://knaufdanoline.fi/properties/acoustics/>
<http://www.ib-toimistokalusteet.fi/easy-akustinen-lattiasermi>
<https://www.isku.com/tuotesarja/look/>
<http://ins-news.com/fi/100/905/2263/Hut-ja-Q-corner---tyylikk%C3%A4%C3%A4t-kaluste-uutuudet-G%C3%B6tessonilta-ja-Workspacelta.htm>
<http://stalbox.fi/ratkaisut/>
<http://standardoffice.eu/fi/uutiset/uutuustuote-fe-akustiset-ratkaisut/?show=archive>
<https://innogreen.fi/fi/referenssit/>
http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107147/Voutilainen_Laura.pdf;jsessionid=851AB43B4148720D3DA78979BEE06F26?sequence=1
https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/isku/app/uploads/18141015/Oppikuvasto_2015_FIN_LR.pdf

- <http://www.kauppalehti.fi/uutiset/tamperelaisyrittys-nappasi-kaluste-oscarin-usassa/Nb7ke5ma>
<https://www.frameryacoustics.com/fi/>
<https://www.steelcase.com/products/acoustic-solutions/>
<https://www.knoll.com/design-plan/products/by-category/architectural-and-acoustic-solutions>
<http://www.hermanmiller.com/products/workspaces/boundary-screens.html>
- [4] Kylliäinen, M. & Pääkkönen, R. 2017. Ääniolosuhteet avoimissa oppimisympäristöissä. Akustiikkapäivät 2017, Akustinen Seura ry, Espoo, 24.-25.8.
- [5] Hongisto, V., Haapakangas, A., Koskela, H., Keränen, J., Maula, H., Helenius, R., Nenonen, S., Hyrkkänen, U., Rasila, H., Sandberg, E. & Hyönä, J. 2012. Käyttäjälähtöiset toimistotilat, tilaratkaisut, sisäympäristö ja tuottavuus, TOTI-hankkeen loppuraportti. Työterveyslaitos, Helsinki, 59 s, Työterveyslaitos, Helsinki, 2012.
- [6] Linkkejä ääntä vaimentavista tuolien tassuista:
<https://www.lekolar.fi/valikoima/kalusteet/aanta-vaimentava-sisustus/aanta-vaimentavat-tarvikkeet/silent-socks-musta-putkijalkoihin-halk-16-22-mm/>
<http://www.clasohlson.com/fi/fi/b/Pienrauta/Helat-&-ripustus/Lattian-suojaaminen>
<http://www.akustiikkapalvelut.fi/akustiikkatuotteet/kalustetassut>

Ääniolosuhteiden kustannusvaikutukset avotoimistoissa

Joni Kemppainen¹, Henry Niemi², Mikko Kylliäinen² ja Antti Mikkilä²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Espoo

² A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Tampere

Tiivistelmä

Rakennusalan kustannustarkasteluissa otetaan huomioon rakennuskustannukset, käyttökustannukset ja elinkaarikustannukset. Käytön aikana syntyy myös kustannuksia, joita yleensä ei oteta huomioon, kuten epätarkoituksenmukaisesta akustiikasta seuraava työajan hukka avotoimistoissa. Tutkimuskirjallisuuden perusteella tunnetaan ratkaisut, joiden mukaan avotoimistot tulee suunnitella akustisesti ja toiminnallisesti. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty myös arvioita työajan hukasta. Tässä tutkimuksessa arvioitiin case-tapauksena 170 työpisteen avotoimistoa, josta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen sekä minimivaatimukset täyttävä suunnitelma, joiden rakennuskustannukset laskettiin. Avotoimiston huoneakustiset ominaisuudet määritettiin huoneakustisella tietokonemallinnuksella ja työajan hukasta aiheutuvat kustannukset tutkimuskirjallisuuden avulla. Tulokset osoittavat, että akustisesti tarkoituksenmukaisen avotoimiston rakennuskustannukset ovat kaksinkertaiset minimivaatimukset täyttävään nähden. Työajan hukka johtaa siihen, että alle vuodessa akustisesti tarkoituksenmukainen avotoimisto on jo minimivaatimukset täyttävää edullisempi. Viidessä vuodessa minimivaatimukset täyttävän avotoimiston aiheuttamat kustannukset ovat kahdeksankertaiset rakennuskustannuksiin verrattuna, ja tarkoituksenmukainen avotoimisto on huomattavasti minimivaatimukset täyttävää edullisempi.

1. Johdanto

Rakennusalan kustannustarkasteluissa otetaan huomioon rakennuskustannukset, käyttökustannukset ja nykyisin jossain määrin myös elinkaarikustannukset. Tilojen käytön aikana syntyy kuitenkin kustannuksia, joita yleensä ei oteta huomioon. Tällaisia ovat esimerkiksi akustisesti epätarkoituksenmukaisten tilojen aiheuttamat kustannukset terveysvaikutusten tai työajan hukan vuoksi.

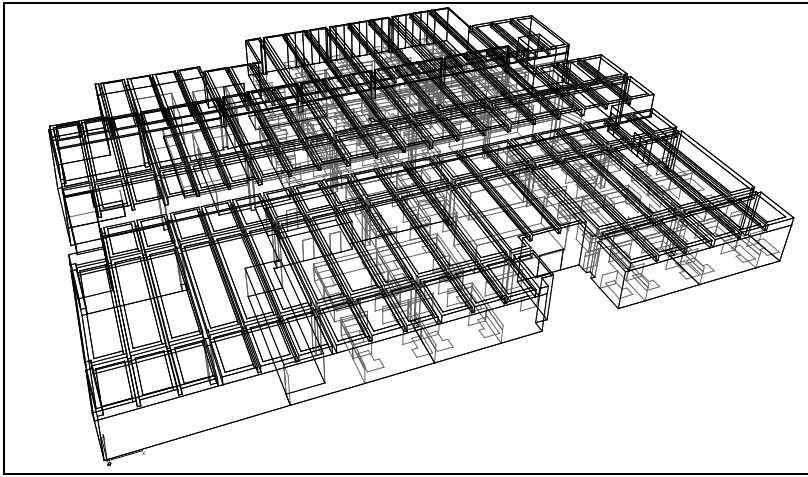
Avotoimistojen akustiikkaa on tutkittu Suomessa ja kansainvälisesti varsin paljon. Tutkimuskirjallisuuden perusteella tunnetaan ratkaisut, joiden mukaan avotoimistot kannattaa suunnitella akustisesti ja toiminnallisesti. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty myös arvioita työajan hukasta silloin, kun avotoimiston akustiikka ei vastaa tarkoitustaan. Työajan hukka voidaan laskea puheenerotettavuuden ja puhesalien akustisen hyvyyden arvioimiseksi alkujaan kehitetyn puheensiirtoindeksin STI avulla. Puheensiirtoindeksiä voidaan käyttää myös puheen häiritsevyyden ja puheyksityisyyden arviointiin. [1–2]

Tässä tutkimuksessa arvioidaan case-tapauksena 170 työpisteen avotoimistoa, josta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen suunnitelma sekä minimivaatimukset täyttävä suunnitelma. Kummankin vaihtoehdon akustisista ratkaisuista syntyvistä rakennuskustannuksista laaditaan kustannusarvio ja tutkimuskirjallisuuden perusteella arvioidaan työajan hukasta syntyviä kustannuksia. Huoneakustisen tietokonemallinnuksen tulokset varmistetaan akustisin mittauksin standardin ISO 3382-3 [1] mukaisesti. Tutkimus on laajemmin selostettu lähteessä [3].

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Huoneakustinen tietokonemallinnus

Avotoimiston akustisia parametreja tutkittiin huoneakustisella tietokonemallinnuksella kaupallisella Odeon Auditorium 14 -ohjelmalla. Toimiston geometriasta laadittiin kuvassa 1 esitetty kolmiulotteinen tilamalli, joka vietiin huoneakustiikan mallinnusohjelmaan. Ohjelmassa kaikille mallin pinnoille määritettiin absorptio- ja sirontakertoimet. Tilaan sijoitettiin lähde- ja vastaanottopisteitä standardin ISO 3382-3 [1] mittausmenetelmän mukaisesti mittalinjaan, minkä jälkeen ohjelma laskee lähdepisteistä impulssivasteen jokaisen vastaanottopisteen kohdalle.



Kuva 1. Avotoimiston huoneakustinen malli.

Impulssivasteen avulla laskettiin muun muassa puheesta aiheutuva keskiäänitaso ja puheensiirtoindeksi kaikissa vastaanottopisteissä. Näiden arvojen avulla laskettiin standardin ISO 3382-3 [1] mukaiset mittaluvut leviämismuunnosaste $D_{2,s}$ ja häiritsevyyssäde r_D . Leviämismuunnosaste kuvaa sitä kuinka paljon ääni vaimenee etäisyyden kaksinkertaistuessa ja se määritetään laskemalla puheen aiheuttama keskiäänitaso vastaanottopisteissä. Häiritsevyyssäde kuvaa sitä etäisyyttä, jonka jälkeen puheensiirtoindeksi STI normaalilla äänellä puhuvasta henkilöstä putoaa alle arvon 0,5.

2.2 Rakennuskustannukset

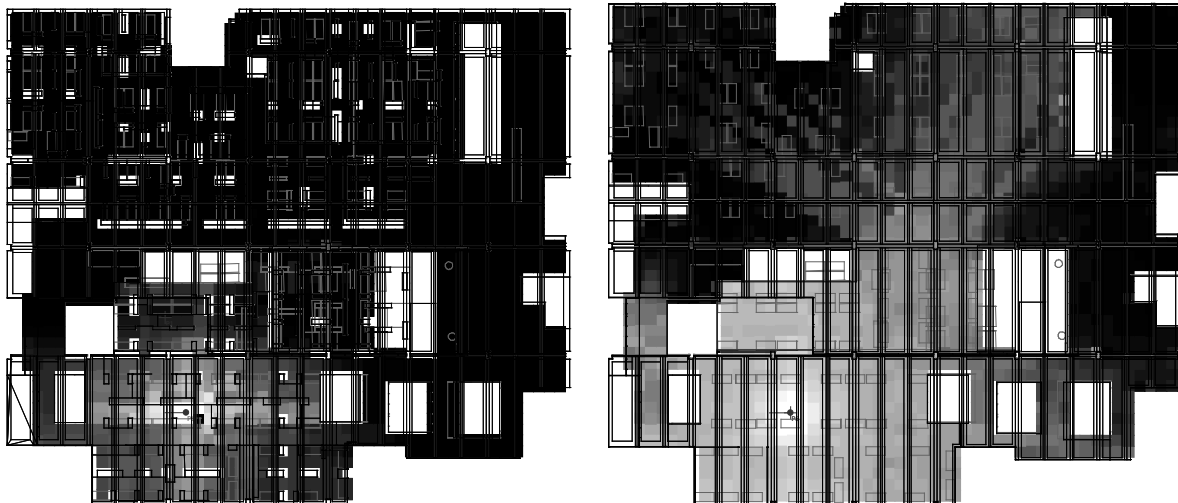
Mallinnuksen avulla tutkittiin kahta eri vaihtoehtoa avotoimistolle. Avotoimisto 1 vastaa huoneakustiikaltaan tarkoituksenmukaisesti suunniteltua avotoimistoa. Tässä vaihtoehdossa työpisteet on eroteltu toisistaan kaapeilla ja seinäkkeillä. Toimiston katto on täynnä akustiikkamineraalivillaa ja lattia on peitetty tekstiilimatolla. Lisäksi tilaan on asennettu peiteäänijärjestelmä, jonka tuottama peiteäänitaso $L_{A,eq,B}$ on 42 dB [2]. Avotoimisto 2 on suunniteltu täyttämään jälkikaiun osalta standardin SFS 5907 [5] toimistuhuoneille asettaman vähimmäistason, eli laatuluokituksen D. Taustäänitaso $L_{A,eq,B}$ on 33 dB. Toimistossa ei työpöytien lisäksi ole muita kiintokalusteita. Katto on täynnä akustiikkamineraalivillaa ja lattiamateriaalina on käytetty muovimattoa. Vaihtoehdoille 1 ja 2 on laskettu kalusteiden ja huoneakustisten pintojen materiaali- ja työkustannukset sekä peiteäänijärjestelmän kustannukset. Muut kuin akustisista ratkaisuista syntyvät kustannukset oletetaan samoiksi

molemmissa vaihtoehdoissa. Vaihtoehtojen rakennuskustannukset on määrittänyt A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy:n laskentayksikkö. Hinnat on laskettu ilman arvonlisäveroa (alv 0 %).

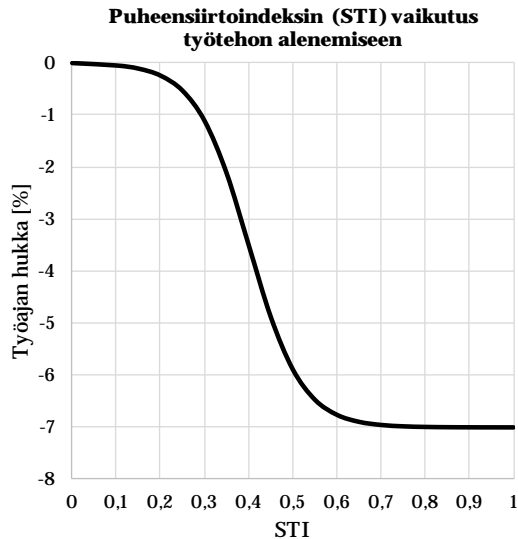
2.3 Työajan hukan kustannukset

Huoneakustisen tietokonemallinnuksen avulla määritettiin puheensiirtoindeksin STI arvo eri puolilla toimistoa (kuva 2), kun äänilähde oli neljässä pisteessä avotoimistossa. Olettaen, että avotoimistossa on aina vähintään yksi puhuja jossain päin, STI:n perusteella voitiin laskea Hongiston mallin [3] ja tämän perusteella sen synnyttämät kustannukset. Kuvassa 3 on esitetty puheensiirtoindeksin vaikutus työtehon alenemiseen Hongiston [3] mukaisesti.

Työajan hukan kustannusten selvittämiseksi on oletettu, että toimiston työajasta 90 % on laskutettavaa ja työtunnin hinta on 60 €/h (alv 0 %). Äänilähde on sijoitettu neljään pisteeseen, joiden perusteella on laskettu puheensiirtoindeksin arvon jakaumat koko toimistossa. Puheensiirtoindeksin lasketuista neljästä jakaumasta on laskettu keskiarvot, joiden perusteella on arvioitu työajan hukkaa vaihtoehdoissa 1 ja 2. Toisin sanoen on oletettu, että jossain neljästä pisteestä yksi työntekijä puhuu noin neljänneksen ajan työpäivästä.



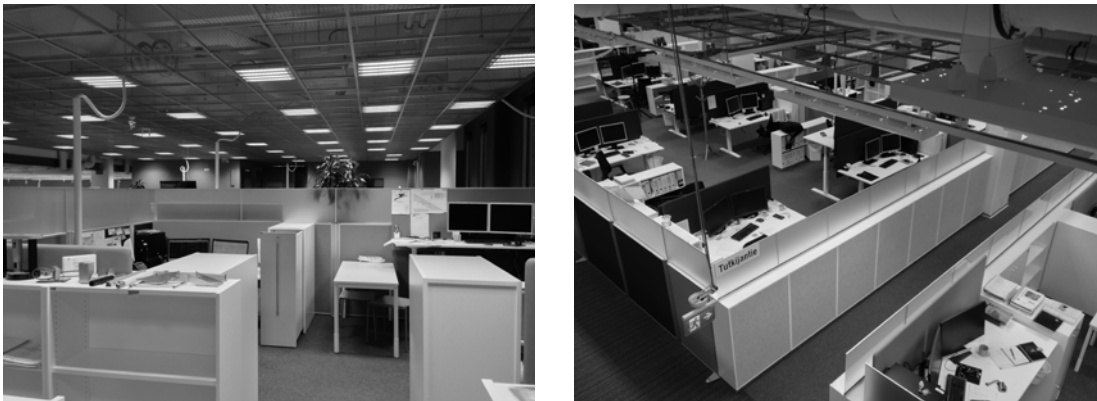
Kuva 2. Puheensiirtoindeksin STI leviäminen suunnitellussa (vasemmalla) ja ainoastaan vähimmäisvaatimukset täyttävässä (oikealla) avotoimistossa. Vaaleimmalla väreillä on esitetty suurimmat puheensiirtoindeksin arvot.



Kuva 3. Puheensiirtoindeksin vaikutus työtehon alenemiseen Hongiston mallin [3] perusteella.

2.4 Huoneakustiset mittaukset

Mallinnustulosten varmistamiseksi valmiissa avotoimistossa mitattiin leviämismuunnosaste $D_{2,s}$ ja häiritsevyyssäde r_D kolmella mallinnusta vastanneella mittalinjalla standardin ISO 3382-3 [1] mukaisesti. Avotoimisto on käytännössä ominaisuuksiltaan vaihtoehto 1 mukainen, joskin kalusteiden sijainnissa on pieniä eroja todellisen ja mallinnetun tilan välillä (kuva 4).



Kuva 4. Vaihtoehdon 1 mukainen valmis avotoimistotila.

3. Tulokset

Taulukossa 2 on esitetty huoneakustisen mallinnuksen avulla lasketut parametrit. Parametrit on esitetty mallinnetuissa vaihtoehtoisissa 1 ja 2. Rakennetussa avotoimistossa suoritettujen standardin ISO 3382-3 [1] mukaisten huoneakustisten mittausten tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Mallinnettujen toimistojen standardin ISO 3382-3 mukaiset avotoimistoparametrit.

Vaihtoehto 1 – suunniteltu huoneakustiikka			
Mittauslinja	r_D [m]	r_P [m]	$D_{2,s}$ [dB]
1	4,2	12,8	5,7
2	7,0	13,4	6,9
3	7,7	18,5	5,3

Vaihtoehto 2 – vähimmäisvaatimukset täyttävä ratkaisu			
Mittauslinja	r_D [m]	r_P [m]	$D_{2,s}$ [dB]
1	18,2	37,7	2,9
2	20,5	41,0	3,5
3	17,5	41,7	3,4

Taulukko 3. Mitatut avotoimistoparametrit valmiissa avotoimistossa.

Peiteäänän kanssa (mallinnettu vaihtoehto 1)			
Mittauslinja	r_D [m]	r_P [m]	$D_{2,s}$ [dB]
1	9,4	18,4	6,3
2	7,8	18,7	6,1
3	10,8	21,1	6,3
Ilman peiteääntä			
Mittauslinja	r_D [m]	r_P [m]	$D_{2,s}$ [dB]
1	22,6	37,1	6,3
2	16,7	31,8	6,1
3	13,3	25,4	6,3

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty eri puheensirtoindeksin STI vyöhykkeillä työskentelevien työntekijöiden määrät mallinnuksen perusteella. Taulukoissa on esitetty myös Hongiston mallin [3] mukaisesti määritetyn työajan hukan aiheuttama kustannusvaikutus vyöhykkeittäin.

Taulukko 4. Työajan hukasta aiheutuva kustannusmenetys tarkoituksenmukaisesti suunnitellussa avotoimistossa (vaihtoehto 1) yhden vuoden aikana.

STI	> 0,8	0,7–0,79	0,6–0,69	0,5–0,59	0,4–0,49	0,3–0,39	0,2–0,29
Työntekijöitä	1	1	1	4	5	9	9
Kustannusmenetys	1628 €	6477 €	4722 €	17825 €	17116 €	8805 €	2021 €
Kustannusmenetys yhteensä							58595 €

Taulukko 5. Työajan hukasta aiheutuva kustannusmenetys vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa (vaihtoehto 2) yhden vuoden aikana.

STI	> 0,8	0,7–0,79	0,6–0,69	0,5–0,59	0,4–0,49	0,3–0,39	0,2–0,29
Työntekijöitä	1	4	14	20	31	27	19
Kustannusmenetys	1628 €	22669 €	86569 €	109692 €	100253 €	28228 €	4267 €
Kustannusmenetys yhteensä							353306 €

Akustisten ratkaisujen materiaali- ja asennuskustannukset ovat vaihtoehdon 1 mukaisessa tarkoituksenmukaisesti suunnitellussa avotoimistossa 517 711€ ja vaihtoehdon 2 mukaisessa vähimmäistason mukaan suunnitellussa avotoimistossa 261 774€. Kustannukset on laskettu ilman arvonlisäveroa (alv 0%).

4. Tulosten tarkastelu

Mallinnuksen perusteella voidaan todeta, että avotoimiston suunnittelu vähimmäisvaatimusten mukaisesti altistaa suuren määrän työntekijöitä häiritsevälle puheelle. Akustisesti tarkoituksenmukaisesti suunnitellun avotoimiston materiaali- ja asennuskustannukset ovat noin kaksinkertaiset vähimmäistason verrattuna. Toisaalta työtehoon perustuva kustannusmenetys on vähimmäisvaatimukset täyttävässä avotoimistossa kuusinkertainen tarkoituksenmukaiseen

avotoimistoon verrattuna. Tulosten perusteella tarkoituksenmukaisesti suunniteltu avotoimisto maksaa siten itsensä takaisin jo vuoden kuluessa. Viiden vuoden käytön jälkeen vähimmäisvaatimukset täyttävä avotoimisto on tullut työajan hukan vuoksi noin 1,2 miljoonaa euroa kalliimmaksi kuin tarkoituksenmukainen avotoimisto.

Mitattu leviämismuunnos oli mallinnettua suurempi. Tämä voi osittain johtua siitä, että kalusteiden ja talotekniikan aiheuttamaa muunnosta oli aliarvioitu tietokonehallinnuksessa. Peiteäänän kanssa mitatut häiritsevyyssäteet ovat taas mallinnettuja suurempia. Tämä johtuu siitä, että peiteäänijärjestelmän tuottama A-painotettu taustäänäntaso $L_{p,A,B}$ on mallinnuksessa 42 dB, kun taas toimistossa peiteäänän taustäänäntaso $L_{p,A,B}$ oli mittauksissa keskimäärin noin 38 dB. Rakennetussa toimistossa on tällöin peiteäänän tasoa nostamalla mahdollista saavuttaa mallinnuksen perusteella arvioidut häiritsevyyssäteet.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin case-tapauksena 170 työpisteen avotoimiston huoneakustisia olosuhteita ja niiden vaikutusta työtahokkuuteen. Avotoimistosta laadittiin akustisesti tarkoituksenmukainen sekä minimivaatimukset täyttävä suunnitelma, joiden rakennuskustannukset laskettiin. Avotoimiston huoneakustiset ominaisuudet määritettiin huoneakustisella tietokonehallinnuksella ja työajan hukasta aiheutuvat kustannukset tutkimuskirjallisuuden avulla. Mallinnuksen tulokset tarkistettiin suorittamalla Standardin ISO 3382-3 [1] mukaisia huoneakustisia mittauksia valmiissa avotoimistossa.

Tulokset osoittavat, että akustisesti tarkoituksenmukaisen avotoimiston rakennuskustannukset ovat kaksinkertaiset minimivaatimukset täyttävään nähden. Työajan hukasta seuraavat kustannukset kuitenkin johtavat siihen, että alle vuodessa akustisesti tarkoituksenmukainen avotoimisto on jo minimivaatimukset täyttävää edullisempi. Viidessä vuodessa minimivaatimukset täyttävän avotoimiston aiheuttamat kustannukset ovat työajan hukan vuoksi kahdeksankertaiset rakennuskustannuksiin verrattuna ja tarkoituksenmukainen avotoimisto on huomattavasti minimivaatimukset täyttävää edullisempi.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN ISO 3382-3-2012. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [2] Hongisto, V. ja Kylliäinen, M. 2008. RIL 243-3-2008 Rakennusten akustinen suunnittelu, toimistot. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [3] Kemppainen, J. 2017. Akustisten olosuhteiden kustannusvaikutukset. Diplomityö. Espoo, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu.
- [4] Hongisto, V. 2005. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air* 15, s. 458–468.
- [5] SFS 5907-2004. Rakennusten akustinen luokitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Hoitohenkilökunnan kokemus sisäympäristöstä Tampereen yliopistosairaalassa

Valtteri Hongisto¹ Riikka Helenius² ja Isto Nordback³

¹ Työterveyslaitos

² Turun ammattikorkeakoulu, sisäympäristön tutkimusryhmä

³ Tampereen yliopistollinen sairaala, yhtymähallinto

Tiivistelmä

TAYS:ssa toteutettiin hoitohenkilökunnan parissa työympäristön laatua koskeva kyselytutkimus, johon vastasi 885 työntekijää. 41 % oli tyytyväisiä työympäristöön. Tyytyväisyys vaihteli merkittävästi yksiköiden kesken. Potilastyötä haittasivat eniten tilojen ahtaus, tilojen epätarkoituksenmukaisuus ja epäjärjestys. Kirjallisia töitä haittasivat eniten tilojen ahtaus, puheäänien ja tilojen epätarkoituksenmukaisuus. Huonetilojen ilmanvaihtotapa, jäähdytyksen olemassaolo ja äänenabsorption määrä arvioitiin yksiköissä, joista saatiin yli 10 vastausta. Tyytyväisyys työympäristöön keskimäärin parempi työyksiköissä, joissa oli ilmastointi, paljon äänenabsorptiota ja koneellinen ilmanvaihto.

1. Tausta ja tavoite

Fysikaaliseen sisäympäristöön (ilmanvaihto, lämpöolot, valaistus, ääniolot) ja käytettävyyteen panostetaan sairaaloissa enenevässä määrin enemmän. Tämä näkyy peruskorjauksissa ja uudisrakennuksissa. Olosuhteet vaihtelevat kuitenkin hyvin paljon työyksiköiden välillä, koska sairaalat koostuvat vanhasta ja uudesta rakennuskannasta. Tämä tarjoaa tutkimuksellisesti hyvät edellytykset selvittää, onko hoitohenkilökunnan kokemuksissa eroja sisäympäristön laadun osalta.

Hongisto ym. [1] havaitsivat TAYS:n teho-osaston tarkkailuyksikössä, että peruskorjaus paransi merkittävästi tyytyväisyyttä työympäristöön. Peruskorjaus sisälsi mm. ilmastonin, pintojen, pohjaratkaisun, valaistuksen ja akustiikan parannuksia. Koettuja olosuhteita ei kuitenkaan voitu yleistää koskemaan sairaaloita laajemmin, koska tutkimus toteutettiin vain yhdessä työyksikössä.

TAYS:ssa on 77 työyksikköä sijaiten rakennuksissa, joita on rakennettu viimeisten 50 vuoden aikana. Työyksiköiden sisäympäristöolosuhteet vaihtelevat objektiivisesti katsoen runsaasti johtuen rakentamisaikana vallinneiden taloteknisten määräysten, teknologioiden ja hoitoympäristöjen muiden tarpeiden tasosta.

Tavoitteena oli selvittää, miten hoitohenkilökunta kokee sisäympäristön iältään ja taloteknisiltä ratkaisuiltaan erilaisissa työyksiköissä ja ovatko sisäympäristön kokemukset yhteydessä sisäympäristön objektiivisesti arvioituun laatuun.

2. Menetelmät

Tutkimus toteutettiin poikkileikkaustutkimuksena Tampereen yliopistosairaalassa (TAYS) 2015-2016 aikana. Kaikkien 77 työyksikön työntekijät kutsuttiin vastaamaan kyselyyn. Kyselyyn vastattiin Internetissä helmi-maaliskuussa 2015.

Työyksiköissä, joista saatiin yli 10 vastausta, tehtiin tilojen objektiivinen arviointi. Arvio tehtiin 30 työyksikössä. Työyksiköt jaettiin viiteen kategoriaan taulukon 1 mukaan.

Käynnillä arvioitiin työyksikön kaikkien huoneiden sisäympäristöolosuhteet (ilmanvaihto, jäähdytys, äänenabsorptio) taulukon 1 mukaan. Työyksikössä oli huoneita keskimäärin 30. Koska huoneiden olosuhteet vaihtelivat yksikön sisällä, raportoidaan olosuhteiden keskiarvo. Muuttujan arvot laskettiin kolmelle huonetyypille käyttötarkoituksen mukaan:

1. henkilökunnan kirjallisen työn huoneille (kansliat, työhuoneet jne.),
2. henkilökunnan muun työn huoneille (tukitilat, käytävät) sekä
3. hoitotyöhön tarkoitetuille huoneille (potilas-, tutkimus-, ja lääkärihuoneet).

Raportoitavat objektiiviset arviot koskevat koko työyksikköä. Kun arvioitiin olosuhteiden yhteyttä työympäristötyytyväisyyteen koko sairaalan tasolla, määritettiin lineaarinen korrelaatio työyksikön objektiivisen muuttujan keskiarvon ja työyksikön työympäristötyytyväisyyden keskiarvon välillä.

Taulukko 1. Työyksiköitä koskevat objektiiviset muuttujat ja muuttujien arvot.

Muuttujan arvo	Ilmanvaihto	Jäähdytys	Äänenabsorptio	Työyksikön tyyppi
0	Ei ilmanvaihtoa	Ei jäähdytystä	Ei lainkaan	
1	Koneell. poisto	Jäähdytys	Alle 25 % katosta	Vuodeosasto
2	Koneell. tulo & poisto		25-75% katosta	Poliklinikka
3			Yli 75 % katosta	Kirurgia/leikkaus
4				Synnytys ja teho
5				Päivystysosasto

3. Tulokset ja niiden tarkastelu

Vastauksia saatiin 885 (vastausaste noin 30 %). Vastajaat koostuivat hoitohenkilökunnasta (695), lääkärihenkilöstöstä (64), erityishenkilöstöstä (57), hallintohenkilöistä (59) ja huoltohenkilöstöstä (10). Vastajista 92,5 % oli naisia.

Tyytyväisysmittarien tulokset on koottu kuvaan 1. Työtyytyväisyys oli melko korkealla tasolla: 85 % oli tyytyväisiä. Tämä on normaalia korkeampi taso. Sen sijaan vain 41 % oli tyytyväisiä työympäristöön kokonaisuutena ja 31 % oli tyytyväisiä ääniympäristöön. Ääniympäristöön ollaan siten tyytymättömämpiä kuin työympäristöön keskimäärin.

Kokemuksia sisäympäristön häiritteijöistä mitattiin erikseen hoitotyön aikana ja toimistotyön aikana. Häirtää mitattiin 5-portaisella asteikolla (1 Ei lainkaan, 2 Vain vähän, 3 Jonkin verran, 4 Melko paljon, 5 Erittäin paljon). Melko tai erittäin paljon häirtää kokeneiden osuus on esitetty kuvassa 2. Potilastyön aikana ympäristötekijöistä eniten häirtää koettiin tilan puutteesta, tilojen epätarkoituksenmukaisuudesta ja epäjärjestyksestä. Sisäilmatekijöistä eniten häirtää koettiin tunkkaisuudesta, melusta ja näköesteiden puutteesta. Lämpötilaan oltiin melko tyytyväisiä. Kirjallisten töiden aikana puheäänistä, keskusteluista, puhelimista ja hälytysäänistä koettu häirtä nousi suuremmaksi. Kirjallisten töiden aikana koetaan samankaltaista häirtää ääniolosuhteista kuin avotoimistoissa. Lämpöolosuhteista (kylmä, kuuma, veto) koettiin ennakoitua vähemmän häirtää. Tässä kohdin on huomattava, että kysely toteutettiin talvella. Tulokset ovat olla tältä osin todennäköisesti erilaiset lämmityskauden ulkopuolella tiloissa, joissa ei ole jäähdytystä. Tällaisia

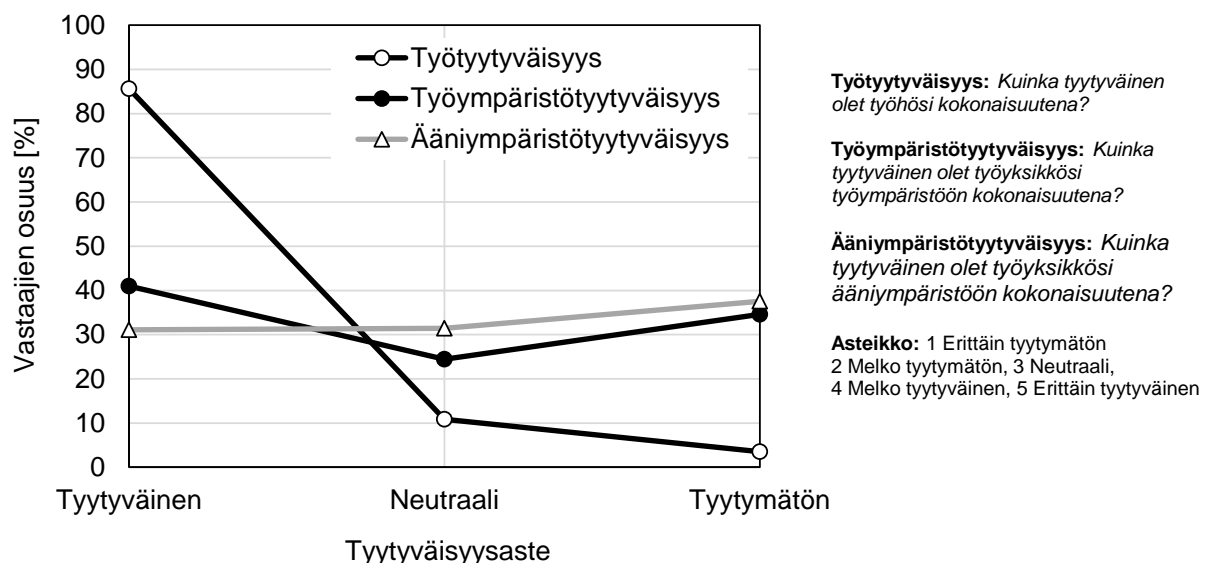
työyksiköitä on kuvan 3 mukaan yli puolet.

Useimmat vastaajat raportoivat käyttävänsä yli 2 tuntia päivässä työrauhaa vaativiin kirjallisiin töihin. Lähes viidennes raportoi, että riittävän rauhallisia tiloja ei ollut koskaan käytettävissä. Kirjallisten töiden aikana melu koettiin yhtä merkittäväksi ympäristön häiritseväksi kuin tilan puute. Puolet raportoi, että heillä oli harvoin tai ei koskaan mahdollista keskustella potilaiden, vieraiden ja muun henkilökunnan kanssa luottamuksellisesti.

Työyksiköiden kokemukset työympäristöstä erosivat toisistaan merkittävästi. Esimerkiksi puheäänistä koettu haitta kirjallisiin töihin vaihteli seuraavasti: keskiarvo 3.2; pienin arvo 1.8; suurin arvo 4.3. Tämän vuoksi nähtiin perusteltuna analysoida, johtuvatko yksiköiden erot objektiivisesti arvioiduista olosuhteista. Korrelaatioanalyysien mukaan (taulukko 2, kuva 3) työympäristötyytyväisyys oli suurempi, jos työyksikön

- hoitotyöhön tarkoitetuissa huoneissa oli koneellinen ilmanvaihto;
- kirjallisiin töihin tarkoitetuissa huoneissa tiloissa oli jäähdytys;
- hoitotyöhön tarkoitetuissa huoneissa oli jäähdytys;
- hoitotyöhön tarkoitetuissa huoneissa oli suuri äänenvaimennusaste.

Työympäristötyytyväisyys ei riippunut kerroksesta tai työyksikkötyypistä.

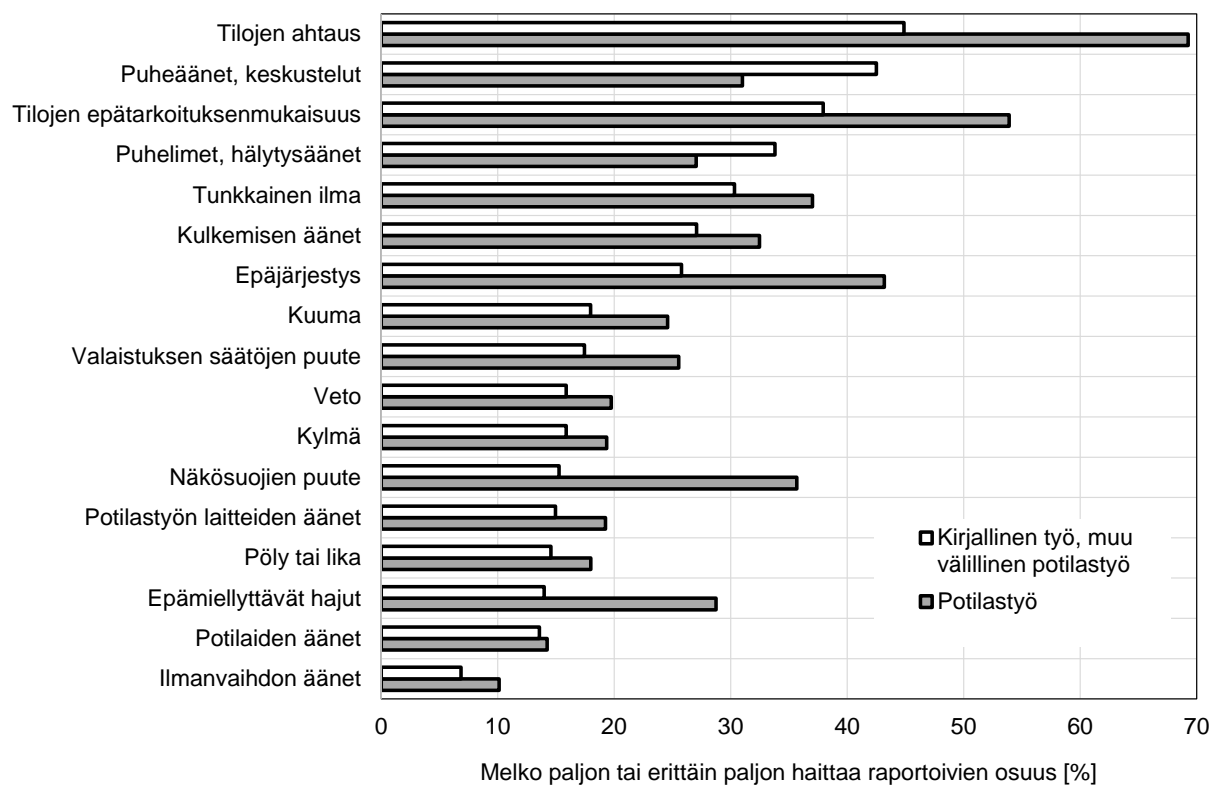


Kuva 1. Työ-, työympäristö- ja ääniympäristötyytyväisyys.

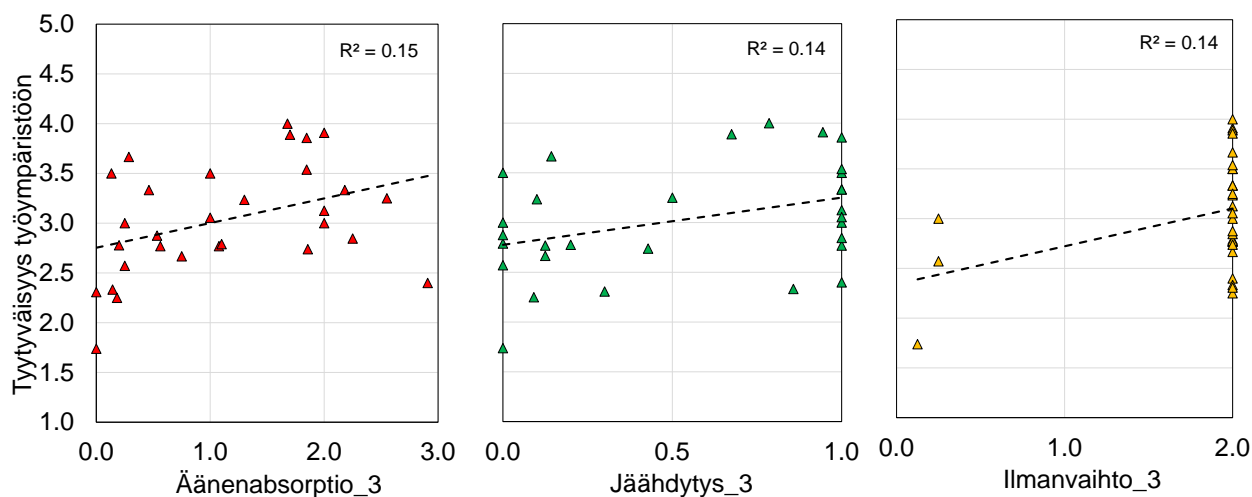
4. Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella sisäympäristön parantaminen kasvattaa työympäristötyytyväisyyttä. Niissä kohteissa, joissa on jäähdytys, hyvä äänenvaimennus ja koneellinen ilmanvaihto, on tyytyväisyys työympäristöön parempi kuin niissä, joissa nämä puuttuvat.

Tutkimustulokset koskevat yhtä sairaalaa, joten tuloksia kannattaa yleistää varauksella. Rakennuskanta oli iältään vaihtelevaa kuten muissakin suomalaisissa keskussairaaloissa. Sen takia tuloksilla on luultavasti laajempaa mielenkiintoa.



Kuva 2. Sisäympäristöstä haittaa kokevien osuus eri työtehtävien aikana. Kaikki vastaajat.



Kuva 3. Työympäristötyytyväisyyden yhteys hoitotilojen äänenabsorptioon määrään ($p=0.034$), jäähdytykseen ($p=0.043$) ilmanvaihtoratkaisuun ($p=0.042$). Yhteydet olivat tilastollisesti merkitseviä. Äänenabsorptio_3 kertoo äänenabsorptiomateriaalin määrästä työyksikön hoitotyön huoneissa (0 Ei lainkaan, 3 Erittäin paljon). Jäähdytys_3 kertoo, miten suuri osuus työyksikön hoitotyön huoneista oli jäähdytetty (0 Ei yksikään; 1 Kaikki). Ilmanvaihto_3 kertoo keskimääräisen ilmanvaihtoratkaisun työyksikön hoitotyön huoneissa (0 Ei lainkaan ilmanvaihtoa, 1 Koneellinen poisto, 2 Koneellinen tulo- ja poisto). Kukin piste edustaa yksittäistä työyksikköä.

Taulukko 2. Työympäristötyytyväisyyden ja työyksikköä koskevien muuttujien väliset Pearsonin korrelaatiokertoimet (R) ja merkitsevyysaste (p, 2-suuntainen). Alaviivalla erotettu numero viittaa huonetyypin käyttötarkoitukseen, jotka on määritelty menetelmissä.

	R	p
Työyksikön kerros	-0.32	n.s.
Osastotyyppi	-0.11	n.s.
Ilmanvaihto_1	0.31	n.s.
Ilmanvaihto_2	0.35	n.s.
Ilmanvaihto_3	0.37	0.042
Jäähdytys_1	0.45	0.012
Jäähdytys_2	0.28	n.s.
Jäähdytys_3	0.37	0.043
Äänenabsorptio_1	0.02	n.s.
Äänenabsorptio_2	0.04	n.s.
Äänenabsorptio_3	0.39	0.034

5. Kiitokset

Projektia rahoittivat Etelä-Pirkanmaan Sairaanhoidopiiri EPSHP, Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy/Ecophon akustiikkakatot ja Turun ammattikorkeakoulu.

Lähdeluettelo

- [1] Hongisto V, Haapakangas A, Helenius R, Oliva D, Ääniympäristön parantamisen vaikutus hoitohenkilökunnan työolosuhteisiin, Akustiikkapäivät 2011, Tampere 11-12.5.2011, 233-238, Akustinen Seura ry, Espoo, 2011.

Suomalaisten sairaalatiilojen akustiikka; mittauksia ja huomioita

Jyrki Kilpikari¹ ja Kalle Lehtonen²

¹ Saint-Gobain Finland Oy/Ecophon, Helsinki

² Promethor Oy, Turku

Tiivistelmä

Sairaalatiloissa aiheutuu melua henkilökunnan ja potilaiden toiminnasta sekä laitteista. Tilojen pinnat ovat usein hygieenisistä syistä kovia niin fyysisesti kuin akustisestikin. Tällöin tilojen jälkikaiunta-aika on pitkä, joka vaikeuttaa puheen erotettavuutta ja lisää meluisuutta. Meluista ympäristö vaikuttaa negatiivisesti tiloissa työskenteleviin sekä seillä hoidettaviin henkilöihin. vaikutuksia voivat olla kohonnut stressitaso, pidentynyt hoitoaika sekä alhainen tehokkuus. Huono puheen erotettavuus puolestaan vaikeuttaa kommunikointia ja voi johtaa pahimmassa tapauksessa hoitovirheisiin.

Tässä tutkimuksessa suoritettiin akustisia mittauksia kolmessa uudessa suomalaisessa sairaalassa. Mittaustuloksia verrattiin standardin SFS 5907 'Rakennusten akustinen luokitus' antamiin ohjearvoihin. Tiloissa nauhoitettiin myös ääninäytteitä havainnollistamaan, kuinka kuulemme mitatut erot akustisissa suureissa.

Tulokset osoittavat, että standardin SFS 5907 antamat luokan A/B ohjearvot voidaan saavuttaa hyvin suunnitelluilla akustisilla ratkaisuilla. Samoin havaitaan, että on myös tiloja joiden ääniympäristöä on tarve parantaa.

1. Johdanto

Terveydenhuollon tilojen toimivalla ääniympäristöllä on suuri merkitys sekä potilaille että henkilökunnalle. Tutkimusten osoittamia hyötyjä ovat [1, 2]:

- parempi hoidon laatu
- alhaisempi verenpaine
- parantanut unen laatu
- kipulääkkeiden pienempi tarve
- alhaisemmat stressitasot
- henkilökunnan parempi hyvinvointi ja tehokkuus.

Terveydenhuollon rakennusten suunnittelua ohjaavat niissä suoritettavat toiminnot ja turvallisuus. Pintamateriaalien on kestävä kulutusta ja oltava helposti puhdistettavia. Käytettävät seinä- ja lattiamateriaalit ovat pääsääntöisesti kovapintaisia ja tiiviitä, jotta voidaan käyttää tavanomaisia puhdistusmenetelmiä ja vältetään lian kertyminen. Kovat pinnat heijastavat ääntä tehokkaasti. Tämä aiheuttaa sen, että äänitasot voivat nousta korkeiksi ja puheenerotettavuus jää huonoksi. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi on kehitetty äänenvaimennusmateriaaleja, jotka täyttävät tilojen hygieniavaatimukset sekä ovat absorptioluokan A vaimennusmateriaaleja standardin ISO 11654 [3] mukaisessa luokittelussa. Ne soveltuvat käytettäväksi sekä katto- että seinäpinnoissa.

Suomalainen standardi SFS 5907 'Rakennusten akustinen luokittelu' [4] antaa eri tyyppisille rakennuksille, mukaan lukien terveydenhuollon rakennukset, jälkikaiunta-ajan ohjearvoja.

2. Menetelmät ja tulokset

Tutkimuksessa suoritettiin huoneakustisia mittauksia kolmessa uudessa suomalaisessa sairaalarakennuksessa. Saadut akustiset suureet määritettiin impulssivasteesta, joka mitattiin RION NL-52 äänitasomittarilla. Jälkikaiunta-aika mitattiin standardin SFS-EN ISO 3382-2:2008 [5] mukaisesti. Puheensiirtoindeksi (STI) määritettiin standardin IEC 60268-16 [6] mukaisesti.

Tilojen kattopinnan akustiset materiaalit ja niiden määrät kirjattiin. Tiloista nauhoitettiin myös ääninäytteitä akustisten suureiden havainnollistamiseksi. Muutamassa tilassa yhdessä sairaaloista mittaukset tehtiin myös ennen ja jälkeen kattopinnan akustiikkalevyjen asennusta. Levyt asennettiin koska tilat oli todettu käytössä ääniympäristöltään toimimattomiksi.

Mittauskohteiksi valittiin kolme uutta sairaalarakennusta, joiden käyttötarkoitukset poikkesivat toisistaan.

Sairaala 1 on lasten- ja naistensairaala, joka on otettu käyttöön vuona 2015. Tiloissa on absorptioluokan A sisäkatot. Henkilökunnan huoneissa oli lisäksi äänenvaimennusmateriaalia seinäpinnoilla. Potilashuoneissa ei ollut vuoteita mittauksia tehtäessä. Tulokset ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Jälkikaiunta-ajat (s), STI-arvot ja SFS 5907 luokka, sairaala 1.

huonetyyppi	taajuus Hz						SFS luokka	STI
	125	250	500	1000	2000	4000		
henkilökunnanhuone 1	0,39	0,40	0,38	0,38	0,42	0,42	A/B	0,79
henkilökunnanhuone 2	0,59	0,48	0,33	0,31	0,37	0,38	A/B	0,82
potilashuone	0,85	0,82	0,55	0,48	0,50	0,48	C	0,77
keskustelutila	0,60	0,45	0,38	0,37	0,40	0,38	A/B	0,78
tutkimushuone	0,58	0,58	0,50	0,41	0,48	0,47	A/B	0,75
aula	0,43	0,44	0,40	0,44	0,43	0,43	A/B	0,81
leikkaussali	0,56	0,60	0,49	0,50	0,55	0,57	A/B	0,75

Sairaala 2 tiloissa on ensiapu, päiväkirurgia ja sydänsairauksien osasto. Sairaala on otettu käyttöön vuona 2014. Sairaalan tiloissa on vaimennusluokan A sisäkatot paitsi ruokalassa ja auditoriossa, joissa kattopinta on reikälevy (vaimennusluokka ei tiedossa). Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Jälkikaiunta-ajat (s), STI-arvot ja SFS 5907 luokka, sairaala 2.

huonetyyppi	taajuus Hz						SFS luokka	STI
	125	250	500	1000	2000	4000		
käytävä, metallikatto	1,41	1,18	1,19	1,40	1,54	1,37	nc	
käytävä, mineraalivillakatto	1,22	1,15	1,12	1,19	1,39	1,21	nc	
hiljainen huone	1,70	0,75	0,49	0,60	0,65	0,70	nc	0,75
potilashuone	0,48	0,36	0,34	0,30	0,37	0,40	A/B	
käytävä	0,47	0,37	0,35	0,31	0,36	0,40	A/B	0,82
toimisto	0,45	0,40	0,40	0,30	0,34	0,37	A/B	0,81
aula	0,80	0,64	1,03	1,40	1,22	1,00	nc	0,66
heräämö	0,48	0,31	0,36	0,30	0,31	0,33	A/B	0,84
leikkaussali	0,47	0,42	0,39	0,38	0,39	0,40	A/B	0,82
auditorio	0,60	0,74	0,84	0,91	0,90	0,87	C	0,66
ruokala	0,99	0,75	0,68	0,53	0,54	0,61	C	0,70

nc = ei kuulu mihinkään luokkaan

Sairaala 3 on lasten ja nuorten psykiatrinen sairaala, joka on otettu käyttöön vuona 2014. Osassa tiloja on vaimennusluokan A sisäkatot ja osassa kovat kipsilevykatot. Joihinkin tiloihin, joissa oli kova kattopinta, lisättiin myöhemmin A-luokan vaimennusmateriaalia kattoon n. 60% kattopinnasta. mittaukset suoritettiin myös tämän asennuksen jälkeen.

Taulukko 3. Jälkikaiunta-ajat (s), STI-arvot ja SFS 5907 luokka, sairaala 3.

huonetyyppi	taajuus Hz						SFS luokka	STI
	125	250	500	1000	2000	4000		
terapiahuone 1, ennen	1,12	1,42	1,58	1,60	1,29	1,02	nc	0,58
terapiahuone 1, jälkeen	0,62	0,68	0,68	0,70	0,62	0,60	nc	0,72
terapiahuone 2, ennen	1,22	1,91	1,80	1,88	1,66	1,18	nc	0,54
terapiahuone 2, jälkeen	0,89	0,64	0,61	0,80	0,69	0,58	nc	0,71
luokahuone 1	0,80	0,60	0,53	0,57	0,58	0,57	C	0,72
luokahuone 2	0,67	0,43	0,43	0,35	0,39	0,38	A/B	0,80
potilashuone, ennen	2,45	2,03	1,96	1,81	1,32	0,99	nc	0,55
potilashuone, jälkeen	0,97	0,60	0,45	0,40	0,42	0,42	C	0,75
käytävä, kova kattopinta	1,02	1,13	1,31	1,45	1,13	0,96	nc	
käytävä, mineraalivillakatto	0,87	0,88	1,11	1,31	1,09	0,79	nc	

nc = ei kuulu mihinkään luokkaan

3. Yhteenveto

Mittausten perusteella standardin SFS 5907 tason A/B mukaiset jälkikaiunta-ajat saavutetaan hoitotiloissa, kun huonetilan koko kattopinta on absorptioluokan A äänenvaimennusmateriaalia. Hyvä akustiikkasuunnittelu ja sen toteuttaminen rakennusvaiheessa on keskeistä hyvän ääniympäristön saavuttamiseksi. Tilan akustisia ominaisuuksia voidaan muuttaa jo käytössä olevassa tilassakin. Tällöin voi olla kuitenkin tilanne, ettei vaimennusmateriaalia pystytä lisäämään riittävästi parhaan tuloksen saavuttamiseksi.

Kun jälkikaiunta-aika on luokan A/B mukainen myös puheenerotettavuus on hyvä.

Muiden kuin hoitotilojen, kuten aulat, ruokalat, auditorio, osalta luokkaa A/B ei saavutettu niin hyvin kuin hoitotiloissa.

Sairaala 3:ssa tehtiin myös äänityksiä akustiikaltaan erilaisissa tiloissa. Ne havainnollistavat hyvin kuinka selvästi korva kuulee 0,2 sekunnin eron jälkikaiunta-ajassa.

Hyvä sisäympäristö on erityisen tärkeää terveydenhuollon rakennuksissa. Toimiva akustiikka on keskeinen osa sitä. Akustiikkasuunnittelun on syytä olla mukana terveydenhuollon rakennushankkeissa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jolloin varmistetaan ääniympäristön toimivuus.

Lähdeluettelo

- [1] S. Berg, Impact of reduced reverberation time on sound-included arousals during sleep, *Sleep*, 24(3), 289-92, 2001
- [2] M. Topf, Hospital noise pollution: an environmental stress model to guide research and clinical interventions, *Journal of Advanced Nursing*, Volume 31, Issue 3, 1996
- [3] ISO 11654:1997 (en). Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. ISO.
- [4] SFS 5907 2004. Rakennusten akustinen luokitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [5] SFS-EN ISO 3382-2:en. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [6] IEC 60268-16. Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Third edition 2003-5. International Electrotechnical Commission.

Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset

ABL

L A A T A T

ABL-Laattojen julkisivukeramiikan käyttö ratkaisi ongelmallisen saneerausprojektin ja toi myös lisäetuja lämmöneristämiseen. Lue lisää projektista kotisivuiltamme: www.abl.fi/pinnalla/artikkelit/tays-verhoutuu-keramiseen-laattaan



Uuden julkisivun piti säilyttää vanhan julkisivun ulkoasu, mutta korjata sen ongelmat. Teräselementin ja ABL-Laattojen Keraaminen Composer-laatta täytti ainoana materiaalina markkinoilla kaikki uudelle julkisivulle asetetut vaatimukset. Projektia varten valmistettuun ja suunniteltuun keraamisiin laattaan valittiin myös sen keveyden ja pintamateriaalin kuviointimahdollisuuksien takia.





**VALITSE MUOVITON
JA HENGITTÄVÄ
RAKENNUSMATERIAALI,
KARKAISTU KEVYTBETONI**

JAMERA 

Kotimaista kädenjälkeä 

Menestys
rakennetaan
yhdessä



**Rakennuttamisen, rakennesuunnittelun,
infrasuunnittelun sekä kallio- ja
ympäristösuunnittelun suunnannäyttäjä**

 **A-INSINÖÖRIT**

www.ains.fi



AKUKON

www.akukon.com

amodus 





Suomen Betoniyhdistys ry

*** edistää betonin kestäväää ja
oikeaa käyttöä ajantasaisella
julkaisu- ja
koulutustoiminnalla ***

**Lue lisää!
www.betoniyhdistys.fi**



Tehokkaat ja joustavat tärinä- ja runkomeluvaimennusratkaisut.



Rakennusteollisuus. Muu teollisuus. Liikenne
Tärinänvaimennusmateriaalit,
-jouset, -ripustimet, elementit ja -matot

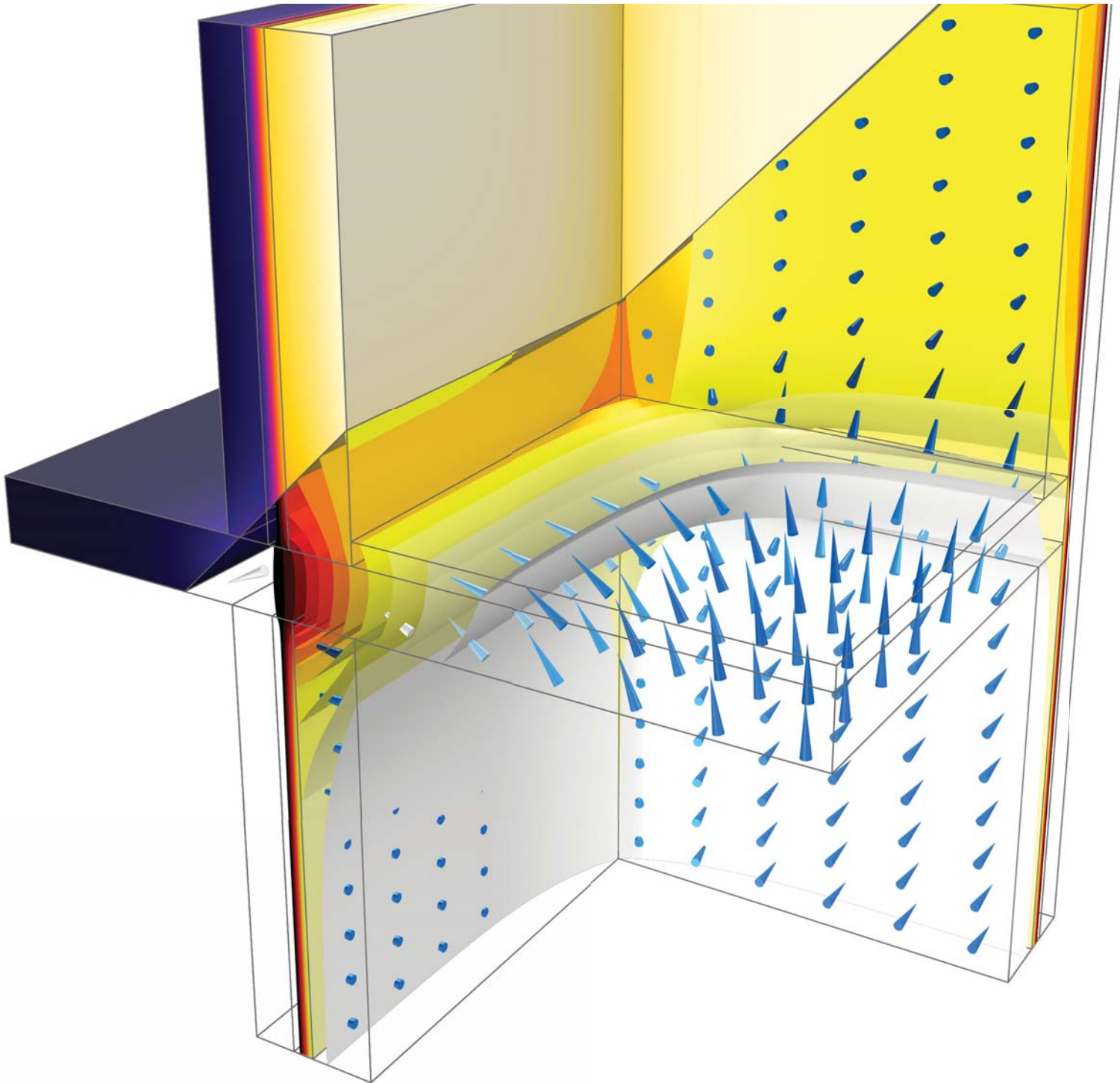
Ota yhteyttä!

Christian Berner OY +358 9 2766 830
christianberner.fi



**CHRISTIAN
BERNER**

Expect more



VERIFY AND OPTIMIZE YOUR DESIGNS

with COMSOL Multiphysics®

The evolution of computational tools for numerical simulation of physics-based systems has reached a major milestone.

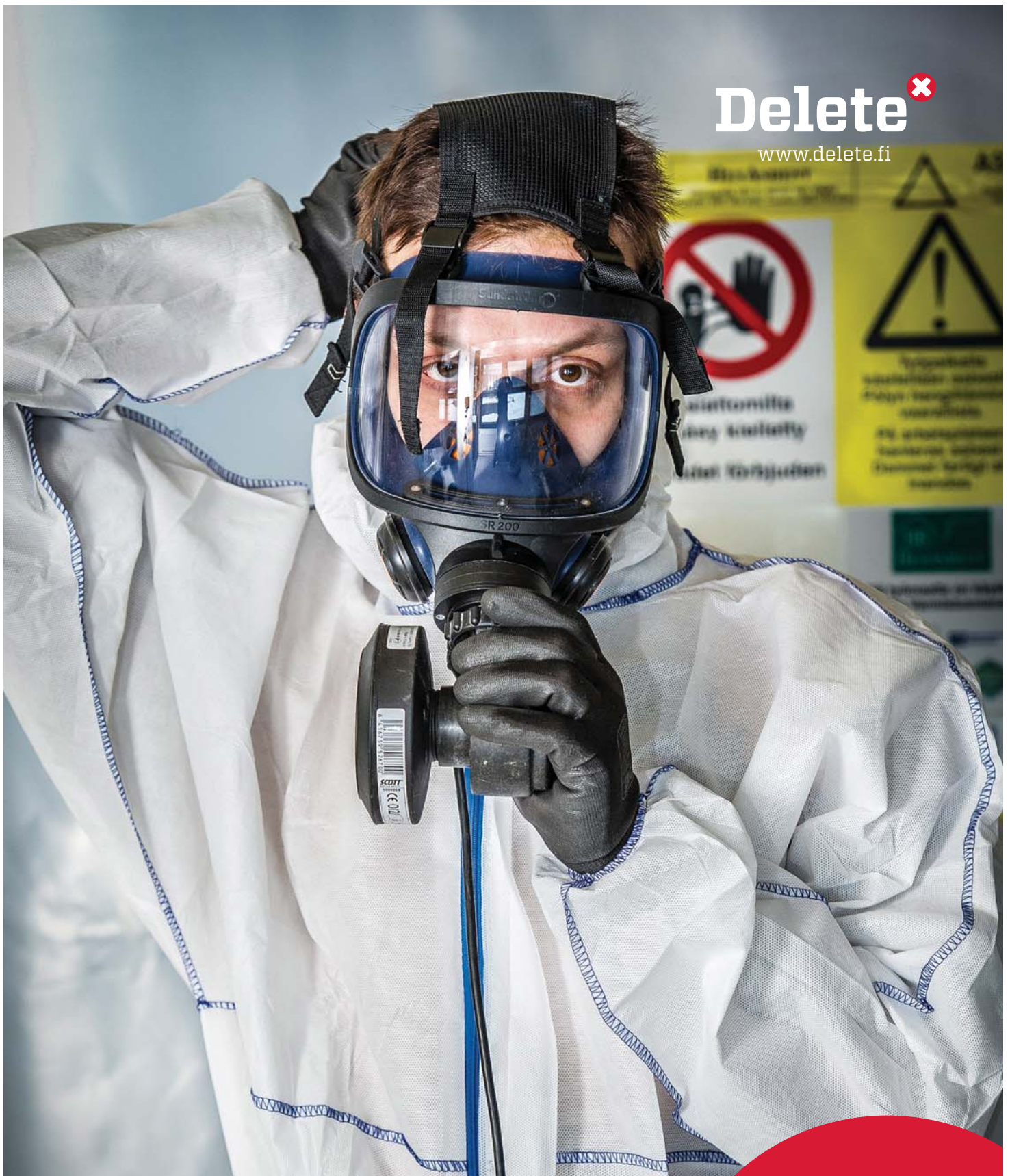
Surpass design challenges with ease using COMSOL Multiphysics®. Work with its powerful mathematical modeling tools and solver technology to deliver accurate and comprehensive simulation results.

Develop custom applications using the Application Builder and deploy them within your organization and to customers worldwide with a local installation of COMSOL Server™.

Benefit from the power of multiphysics today, request a live demo at comsol.fi

Delete 

www.delete.fi



We Delete your problems.

Puh. 010 656 1000 (24h)

info@delete.fi



dimon
GROUP

The logo for FCG, consisting of the letters 'FCG' in a bold, blue, sans-serif font, followed by a solid orange circle. The background of the entire page is a photograph of a modern office interior with a high, vaulted ceiling, large windows, and rows of desks with colorful chairs (blue and red).

FCG.

Rakennusterveys ja sisäilmasto

Kattavaa palvelua
sisäilmaongelmien ratkaisemiseen

www.fcg.fi/rakennusterveys



KOLME KOVAA

Puristuslujuutta, palonkestoa ja todellista energiatehokkuutta - **Finnfoam**, **FF-EPS** ja **FF-PIR** tekevät eristämisestä nopeampaa, turvallisempaa ja kestävämpää.

FINNFOAM
MAAIN PARAS ERISTE

Luja ja vettymätön routaeriste sekä alapohjien ja käännettyjen kattojen lämmöneriste.

FF-EPS

Lattioiden, seinien ja kattojen eristämiseen huomattavasti perinteistä valkoista EPS-lämmöneristettä kustannustehokkaampi vaihtoehto.

FF-PIR

Takaa energiatehokkuuden seinissä ja yläpohjissa perinteistä merkittävästi ohuemalla eristepaksuudella.



**FF-PIR ERISTEIDEN
λ-ARVO ON NYT
0,022 W/mK**

FINNFOAM

www.finnfoam.fi

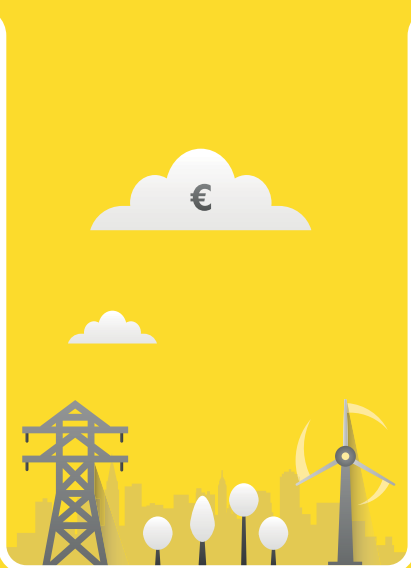
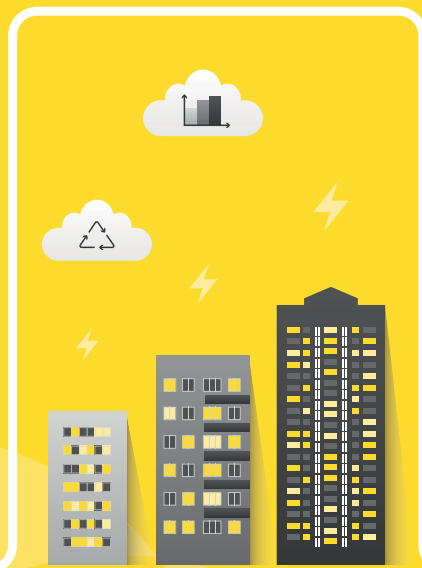
F I S E

Rakennus-, LVI- ja kiinteistöalan henkilöpätevydet FISE Oy
www.fise.fi

Energiaoptimointi

Luotettavia energiatehokkuuden ratkaisuja

Energiaoptimointi on tehokas ja luotettava työkalu rakennushankkeen kustannus- ja energiatehokkuusvaihtoehtojen vertailuun. Se mahdollistaa jopa miljoonien kohteeseen soveltuvien ratkaisujen vertailun samanaikaisesti.



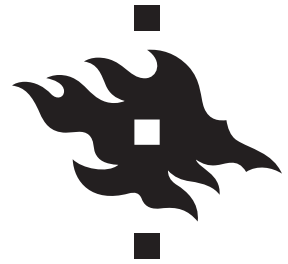
Satojen tuhansien elinkaarikustannussäästöt

Hyödynnämme työssämme Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Aalto yliopiston kehittämää MOBO-työkalua, jonka avulla voidaan saavuttaa jopa satojen tuhansien eurojen elinkaarikustannussäästöt verrattuna tavanomaiseen energiasuunnitteluun.



www.granlundconsulting.fi/energia





Sinustako puhtaan sisäilman monipuolinen osaaja?

RAKENNUSTERVEYSASIAANTUNTIJA (RTA) -KOULUTUS

12.4.2018–15.10.2019 Helsinki ja Turku (45 op)

VTT:n henkilösertifointiin valmentava koulutus

- A.** Sisäympäristön epäpuhtaudet, terveysvaikutukset, tutkiminen ja torjunta, 13 op
- B.** Rakennusfysiikka ja fysikaaliset olosuhteet, kuntotutkimusmenetelmät, rakenne- ja tuotantotekniikka, juridiikka, 14 op
- C.** Ilmanvaihto ja ilmastointitekniikka, 3 op
- D.** Opinnäytetyö 15 op

Koulutus on uuden asumisterveysasetuksen mukainen ja toteutetaan yhteistyössä Turun ammattikorkeakoulun kanssa.

Hinta:

Koulutuksen kokonaishinta on
13 950 € + alv 24% (yht. 17 298 €).

Haku:

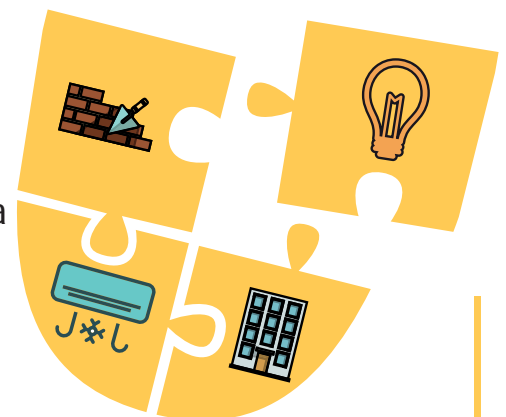
Haku koulutukseen
1.12.2017 – 15.1.2018

Tutustu myös muihin koulutuksiimme:

- Viestintä osana sisäilmaongelmien ratkaisua
- Rakennusterveysalan juridiikka ja raportointi
- Tilaajaosaaminen korjausrakentamishankkeissa

Lisätietoja:

Riitta Aho,
p. 050 448 7170,
riitta.aho@helsinki.fi
sekä verkkosivuiltamme





VEDENERISTYSRATKAISUT VAATIVIIN RAKENTEISIIN

Suunnittelijapalvelut
asiantuntijan tukena

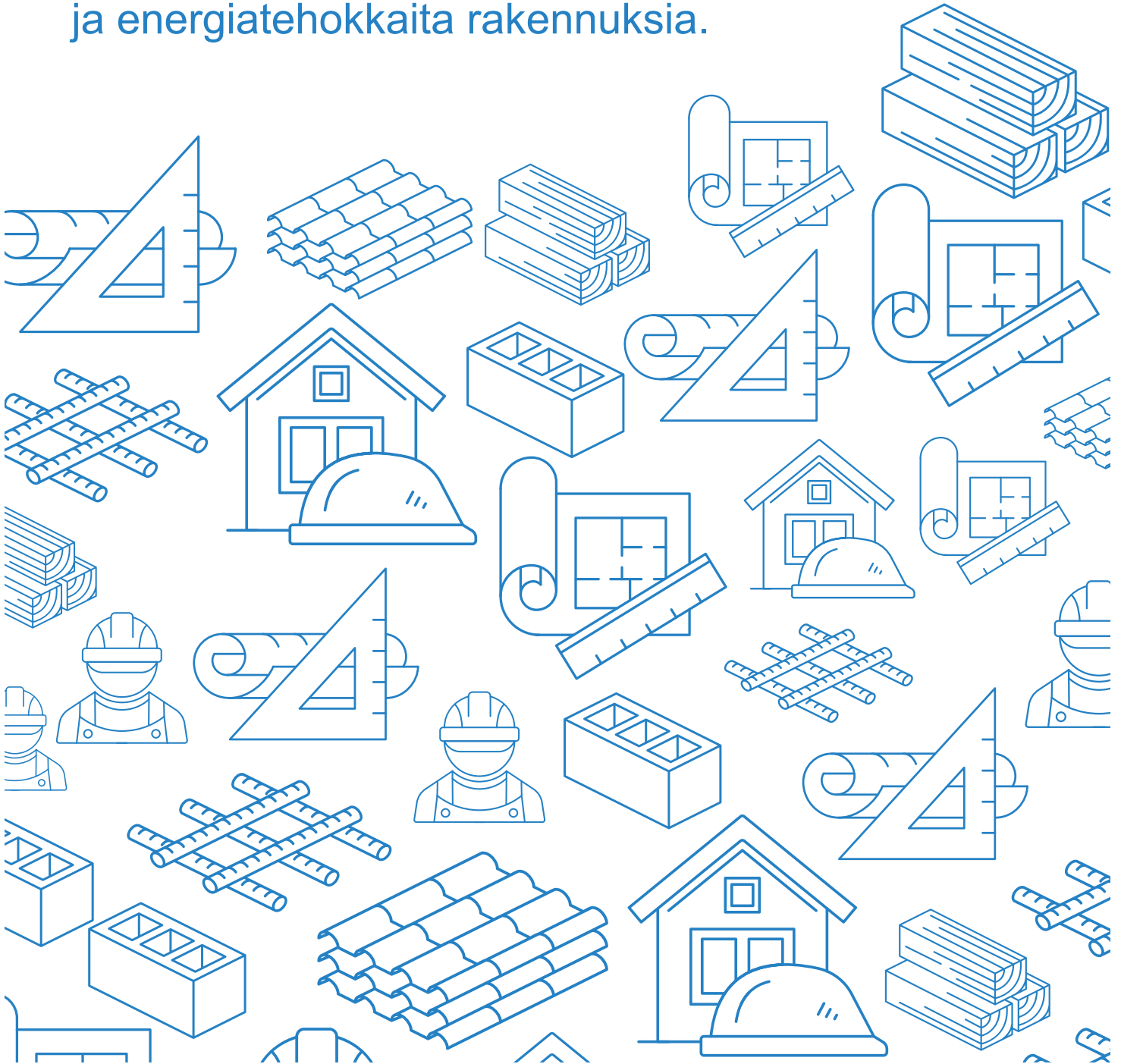
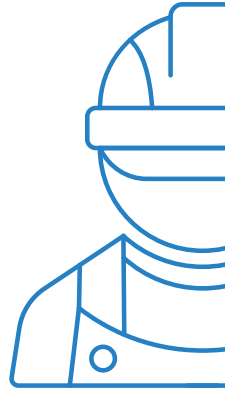
www.icopal.fi

Part of BMI Group



IdeaStructura

Suunnittelemme pitkäikäisiä, laadukkaita ja energiatehokkaita rakennuksia.



www.ideastructura.com

Lämpökamerat ja Tiiviysmittauslaitteet Rakennusten tarkastuksiin



The World's Sixth Sense®



- Lämpökameroita ilmavuotojen paikannuksiin ja laadunvalvontamittauksiin
- Tiiviysmittauslaitteita rakennusten ja huoneistojen tiiviyyden mittaukseen
- Infradex huoltaa, kalibroi ja maahantuo kameroita ja tiiviysmittauslaitteita sekä järjestää koulutuksia



infradex

Lämpökameratekniikan asiantuntija

www.infradex.com

Hakamäenkuja 7 | 01510 Vantaa

info@infradex.fi | Puh. 09 876 1011

MEHTO
Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy



Lämpökuorman hallinnan merkitys kasvaa ikkunapinta-alojen kasvaessa. Inwidon automaattisesti ohjattava Copenhagen Blinds -kaihdinjärjestelmä vähentää jäähdytystarvetta ja energiankulutusta.

MAAILMA TULEE ÄLYKKÄÄMMÄKSI – NIIN IKKUNATKIN

VASTAAMME TULEVAISUUDEN TARPEISIIN

Ikkuna on osa kodin kokonaisuutta eikä se voi pysyä muuttumattomana asumisen, kuluttajien tarpeiden ja rakentamisen muiden ratkaisujen muuttuessa. Alan merkittävimpänä toimijana Inwido haluaa olla suunnanäyttäjänä fiksun asumisen, älykkäiden ikkunoiden, ovien ja liukuovien kehittämisessä.

ÄLYKOTI ON JO TÄÄLLÄ

Automaattisesti lämmön, kellonajan tai auringonvalon mukaan ohjattavat kaihdinjärjestelmät. Ilmanvaihdon älykäs hallinta ja vedoton korvausilma. Elektroniset lukkojärjestelmät ja lukituksen valvonta. Älykkäät järjestelmät ovat jo täällä ja kuuluvat kehityskohteisiimme ikkunoiden ja ovien passiivisesti käytettävyyteen ja energiatalouteen vaikuttavien ratkaisujen rinnalla.

MATALAENERGIATALO HAASTAA TEKNOLOGIAN

Lähes nollaenergiatalot haastavat tulevana vuosina rakentamisen ja rakennustuoteteollisuuden. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen muuttuu. Arkipäivän elämälle yhä tärkeämmät radiosignaalit vaimentuvat selektiivimateriaalien läpi kulkiessaan jopa sadasosaan verrattuna kymmenen vuotta vanhoihin rakennuksiin. Tulevaisuuden ovet ja ikkunat eivät voi olla osa ongelmaa, vaan niiden on oltava osa ratkaisua.

INWIDO ON MUKANA MUUTOKSESSA

Inwidon tuotekehitys seuraa tarkasti ympäröivää maailmaa: analysoimme trendejä, keskustelemme tutkijoiden, jälleenmyyjien, kuluttajien ja yhteistyökumppaneiden kanssa ja osallistumme toimialatyöhön. Innovaatiot ja ratkaisut syntyvät tiimityönä.



MONIPUOLISET RATKAISUT
**RAKENTEIDEN
TIIVIYTEEN**

40
YEARS
PRODUCTION

ISO
CHEMIE
Use the blue technology.

ISO-CONNECT
OUTSIDE EPDM



ISO-PROFIL
FILLER STRIPS & FILLER PIECES



ISO-BLOCO
ONE CONTROL



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



Tutustu tuotteisiin:
www.jaatimet.fi

KASIL FINLAND

KATEPAL



KNAUF



labroc.fi

LABROC

Korjaus- ja uudisrakentamisen
analyysipalvelut ja laadunvarmistus



- Asbesti-, PAH- ja PCB-analyysit
- Mineraalivilla-analyysit
- Pölynkoostumusanalyysit
- Hyötykäyttö- ja kaatopaikkakelpoisuus
- Betonitestausta
- Työnaikainen laadunvarmistus

LABORATORIOT:
Espoo | Tampere | Oulu



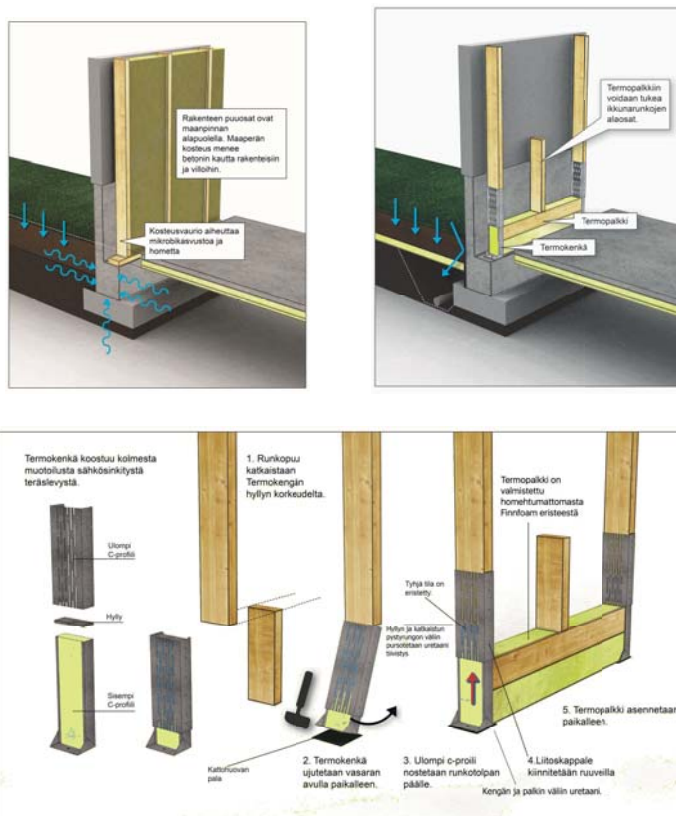


termotuote®

PALKITTU JA PATENTOITU VALESOKKELIN KORJAUSMENETELMÄ: LÄMMIN - EDULLINEN - NOPEA

Kosteusturvallisen rakentamisen ensimmäinen palkinto vuonna 2013

- 700 korjattua rakennusta!
- Päiväkoti-, koulu-, terveyskeskus-, hammashoitola-, rivitalo- ja omakotitalo rakennuksia
- Suomessa on 30 jälleenmyyjä – 30 asentajayritystä
- Termotuotteet ovat saaneet erittäin hyvän vastaanoton ammattirakentajien keskuudessa!



WWW.LAMOX.FI

INFO@LAMOX.FI 050 5835096

The logo for LEANEL is presented within a dark grey rectangular background. The word "LEANEL" is written in a bold, sans-serif font. The letters "LEAN" are white, and the letters "EL" are a light blue color.

LEANEL

Tulevaisuuden puuelementtijärjestelmä

www.leanel.fi



Julkisivuyhdistys r.y.

Energiansäästöä ja pidempiä korjausvälejä lasitetulla parvekkeella.

Parvekelasitus pienentää energiankulutusta sekä suojaa parvekera-
kenteita rapautumiselta. Hyvin hoidettu rakennus säilyttää arvonsa
ja pitää asukkaat tyytyväisinä.



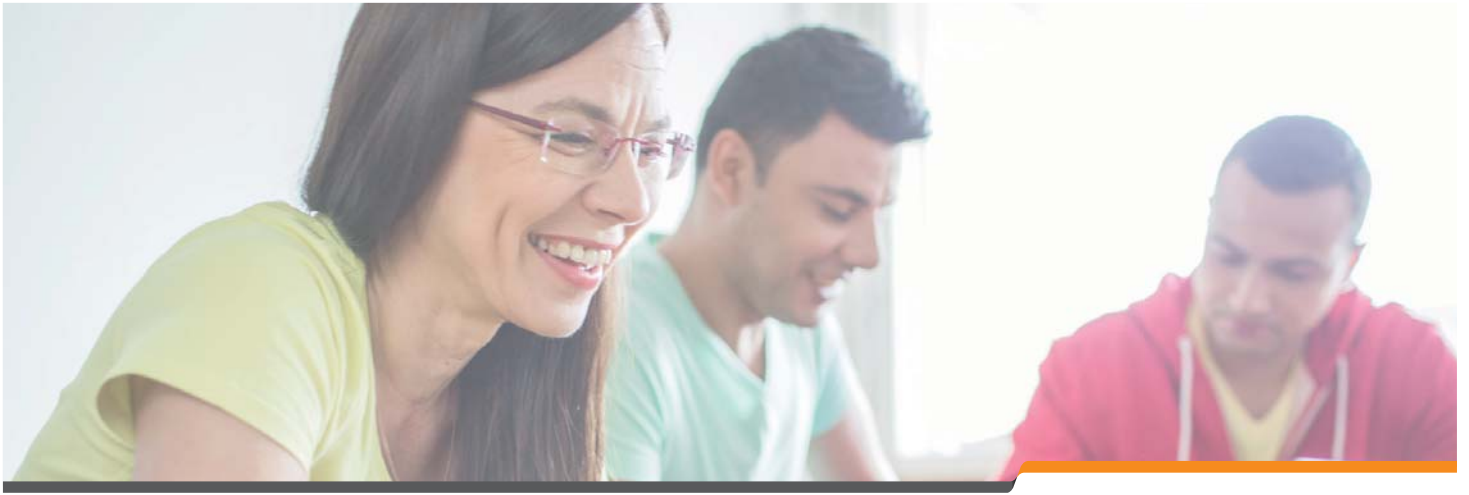
Puh. 020 7403 200 **www.lumon.fi**

(Puh. hinta 8,28 snt + 7 snt/min (lankapuh.) tai + 17 snt/min (matkapuh.)

Lasiterassit | Parvekelasit | Auringonsuojaverhot | Kaiteet | Huolto



www.lasat.fi



Rakennusalan koulutuksia

Rakennusterveys, pätevyyskoulutukset

- Rakennusterveysasiantuntija
- Sisäilma-asiantuntija
- Kosteusvaurion kuntotutkija
- Kosteusvaurion korjaussuunnittelija



Terve talo -koordinaattori, 15 op

- Terve talo -toteutusprosessin hallinta, 5 op
- Sisäolosuhteiden varmistaminen suunnittelussa, 5 op
- Kosteuden ja puhtauden hallinta työmaalla, 5 op

Rakennusfysiikan simulaatiot, 3 op

Opiskele rakenteiden- ja kosteusteknisen toiminnan mallintamista!

YAMK-tutkinnon osat yrityskoulutuksena

Tilaa yrityksellesi esimerkiksi korjausrakentamisen tai talotekniikan YAMK-tasoisia koulutuspaketteja, kysy lisää mahdollisuuksista!

Lisätiedot koulutuksista

Osaamisaluepäällikkö Jorma Säteri, puh. 040 548 5429, jorma.sateri@metropolia.fi
Suunnittelija Aija Saarinen, puh. 040 507 2831, aija.saarinen@metropolia.fi



yrityspalvelu@metropolia.fi
www.metropolia.fi/yrityspalvelut





VOC-analyysit nopeasti

// Akkreditoitu analyysi,
Eviran hyväksyntä



// Tulokset kahden viikon kuluessa

// Kemistin apu tukenasi

// Laitevuokraus ja näytteenottopalvelu

 **mikrobioni**
www.mikrobioni.fi



qPCR – nopea mikrobianaalyysi

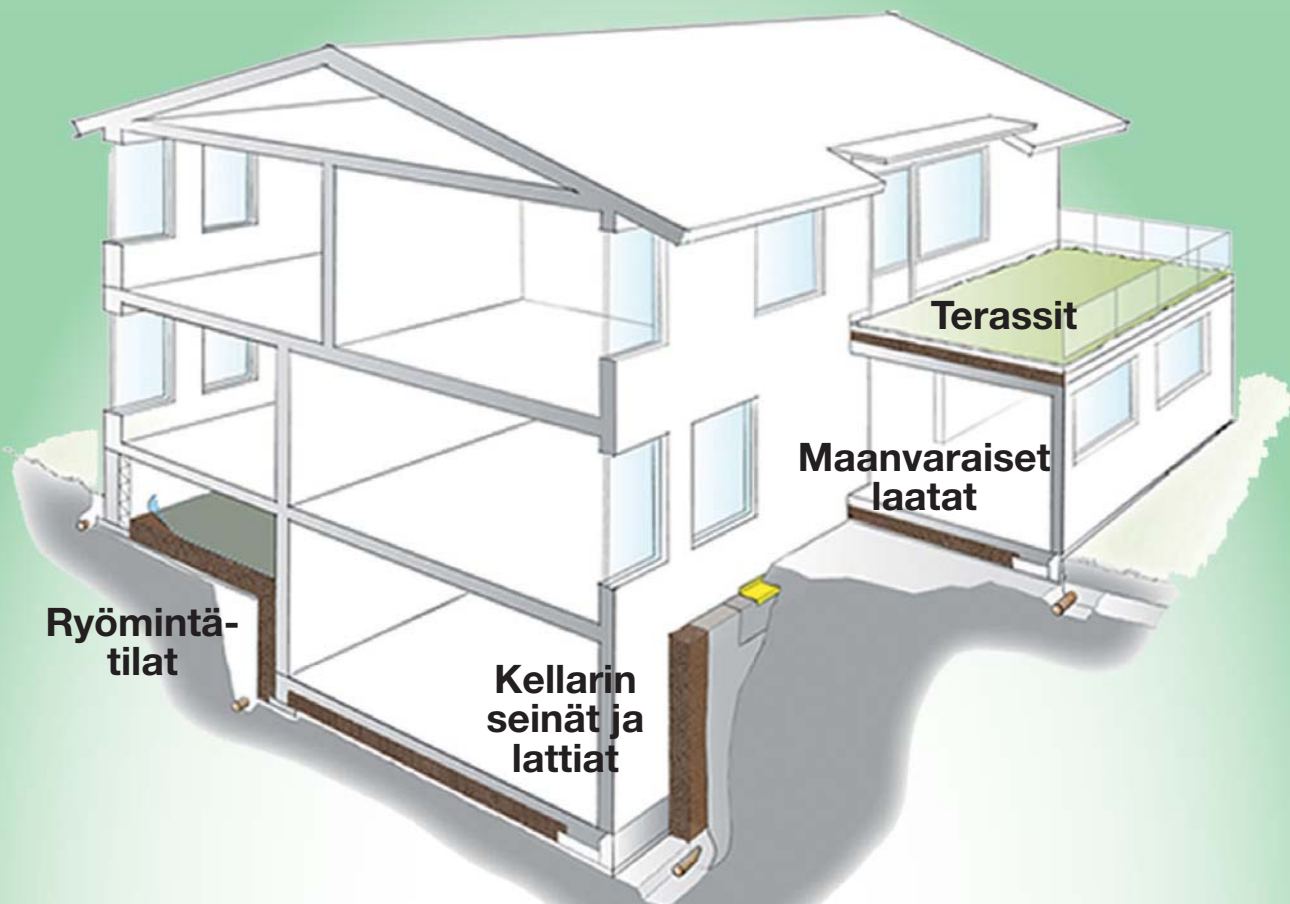
// Akkreditoitu analyysi,
Eviran hyväksyntä



// Rakennusmateriaalinäytteistä

// Tulkitut tulokset nopeasti,
jopa kolmessa työpäivässä

 **mikrobioni**
www.mikrobioni.fi



Tuote **kosteutta** ja
hometta vastaan!

ISODRÄN®

- **Lämmöneristys**
- **Kosteuseristys**
- **Pystysalaoja**
- **Kapillaarikatko**

Katso video www.isodran.fi

 **MUOTTIKOLMIO**

SkamoWall kalsiumsilikaattilevy homesaneeraukseen

- Diffuusioavoin rakennustuote
- Säätelee sisäilman kosteuden
- Korkea pH-arvo
- Käytetään mm. maanvaraisten seinien sisäpuolisena lämmön-eristeenä
- Erinomainen rakennusten sisäpuolinen lisäeriste
- Keski-Euroopassa asennettu yli miljoona neliometriä Skamolin kalsiumsilikaattilevyä
- Täysin myrkytön tuote!

ABRESTO

Oy Abresto Ab
Puusepäncatu 11, 00880 Helsinki
Puh. (09) 755 5944 | info@abresto.fi
www.abresto.fi



SkamoWall on Skamol A/S:n rekisteröimä tavaramerkki joka korvaa SkamoPlus tuotteen

LAINAAMME OIKEITA RAKENNUKSIA

Kuntien ja kaupunginosien asukasmäärät ja -rakenteet muuttuvat nopeasti, ja tilatarpeet niiden mukana. Kehitystä on vaikea ennustaa edes viiden tai kymmenen vuoden päähän, saati rakennuksen koko elinkaaren ajalle. Parmaco lainaa asiakkaiden tarpeiden mukaan muunneltavia oikeita rakennuksia: päiväkoteja, kouluja, hoivakoteja ja toimistotiloja. [parmaco.fi](https://www.parmaco.fi)





SUOJAA KOSTEUELTA

PAROC-kivilla on kovaa kotimaista alkuperää.
Se eristää lämpöä, kestää kosteutta ja tulta - se tarjoaa siis parhaan suojan.

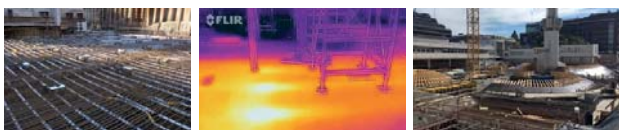
 **PAROC**[®]
Better built environment



FÖÖNIKUIVATUS.FI

Kuivattaa ja pitää rakenteet kuivana!

UUDISKOHTEET

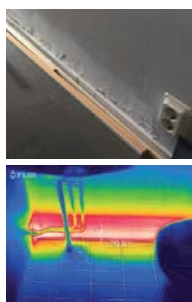
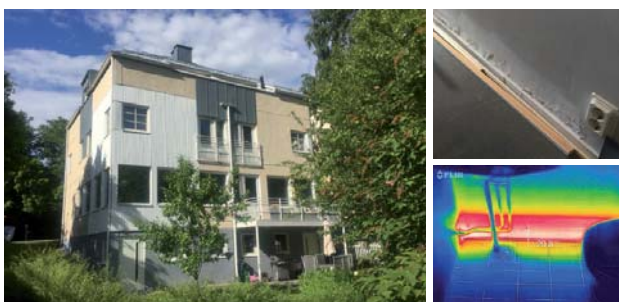


AMOS ANDERSONIN MUSEO - HELSINKI

REMONTTIKOHTEET



KOULU-PÄIVÄKOTI - VIRRAT



KERROSTALON KORJAUS - TAMPERE



OMAKOTITALON KORJAUS - VALKEAKOSKI

TULILATTIA OY

Lapinniemenranta 4, 33180 Tampere

040 5510120 0400 632600

info@foönikuivatus.fi

www.foönikuivatus.fi



Hans Langh



Pietiko Oy

MITTAUSONGELMIESI RATKAISIJA



Kuvaaja: Sari Kaija, Virran Varrelta Design Oy

Puukerrostalojen ammattilaiselta parhaat suur- ja tilaelementtiratkaisut



www.prt-pro.fi



SUOMI RAKENTAA

ja me kerromme siitä.

Kun kyse on rakentamisesta,
talotekniikasta, kiinteistöistä tai infrasta,
Suomessa on yksi media, joka tavoittaa
kaikki koulutetut ammattilaiset.

TILAA RAKENNUSLEHTI:
www.rakennuslehti.fi/tilaus

Rakennuslehti

www.rakennuslehti.fi

sanoma

Kehitä osaamistasi

RATEKOn rakennusterveyden koulutusohjelmat päivittävät ja syventävät osaamistasi asetusten ja määräysten mukaiseksi. Koulutukset antavat kosteus- ja sisäilmaongelmien tutkimiseen vaadittavaa osaamista ja tietoutta.

Koulutukset muodostuvat etä- ja lähiopiskelusta, tehtävistä ja tenteistä. Opinnoissa hyödynnetään verkko-oppimisympäristöä. Aiemmin hankittu koulutus ja osaaminen huomioidaan opinnoissa. Rakennusterveyden koulutusohjelmat alkavat tammikuussa 2018. Lisätiedot rateko.fi

Rakennusterveysasiantuntija, RTA
henkilösertifiointiin valmentava
koulutus

Laajenna monipuolisesti kosteus- ja sisäilmaongelmien selvittämiseen vaadittavaa osaamista. Koulutuksen laajuus 45 op.

Kosteusvaurion korjaustyönjohtaja,
KVKTJ pätevyysvalmentava
koulutus

Osaamista ja varmuutta vaativaankin korjauskohteeseen. Koulutusohjelman laajuus 21 op.

Kosteusvauriokuntotutkija, KVKT
pätevyysvalmentava koulutus
Vahvista kosteus- ja sisäilmaongelmien selvittämiseen vaadittavaa osaamista ja tietoutta. Koulutuksen laajuus 27 op.

Kosteusvaurion korjaussuunnittelija,
KVKS pätevyysvalmentava
koulutus

Syvennä osaamista vaativankin kosteusvaurion korjaamisen suunnitteluun. Koulutuksen laajuus 17 op.

Sisäilma-asiantuntija, SISA henkilö-
sertifiointiin valmentava koulutus
Vahvista sisäilman tutkimiseen tarvittavaa osaamista. Koulutusohjelman laajuus 25 op.

Rakennusterveyden koulutusohjelmien lisäksi RATEKO tarjoaa rakennusalan ajankohtaisia teema- ja päivityskoulutuksia, johtamisen ja esimiestyön koulutusohjelmia, henkilösertifiointeihin ja pätevyityksiin valmentavaa sekä ammatillisiin tutkintoihin valmistavaa koulutusta.

Tutustu koulutustarjontaan
ja ilmoittaudu mukaan
rateko.fi



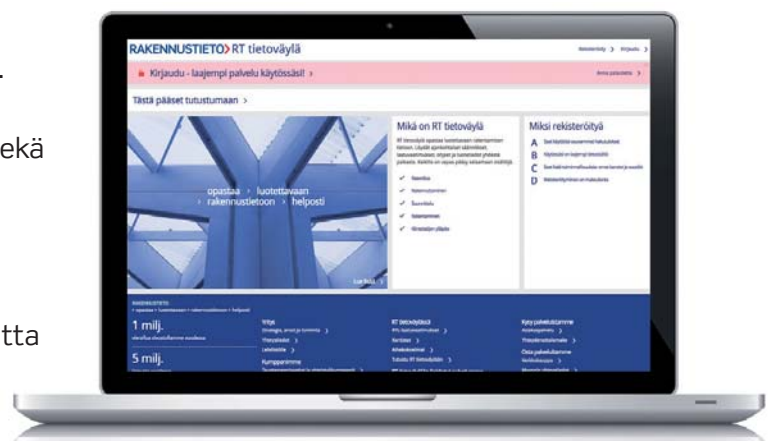
RATEKO



RT tietoväylä kokoaa rakentamis- ja kiinteistöalan luotettavan tiedon

RT tietoväylän kautta löydät RT-, LVI-, Ratu-, KH- ja Infra-kortistot sekä aihekokoelmat sisustussuunnitteluun ja työturvallisuuteen. RT tietoväylään on koottu linkkejä myös muuhun tietosisältöömme ja työvälineisiin sekä alan muuhun luotettavaan tietoon. Selkeä käyttöliittymä helpottaa käyttäjän arkea tietotulvassa.

RT tietoväylä on avoin kaikille käyttäjille, mutta laajimmat sisällöt ja toiminnot ovat tarjolla kortistojen ja aihekokoelmien tilaajille.



RAKLI

Tilaa elämälle

Tule kuuntelemaan esitelmiämme ja tapaamaan meitä osastollemme. Laajasta asiantuntijapalveluiden tarjonnastamme esillä suunnittelu, tutkimukset, Terve talo -asiantuntijapalvelut sekä puhtauden- ja kosteudenhallinta.

TERVEITÄ RAKENNUKSIA (TAIDOLLA JA TUTKIMALLA)

Tutustu palveluihimme
www.ramboll.fi/kiinteistot-ja-rakentaminen

RAMBOLL



RIA

Rakennusinsinöörit
ja -arkkitehdit RIA ry



OIKEA LÄMPÖ OIKEAAN PAIKKAAN



OIKEAT LÄMMITYSRATKAISUT

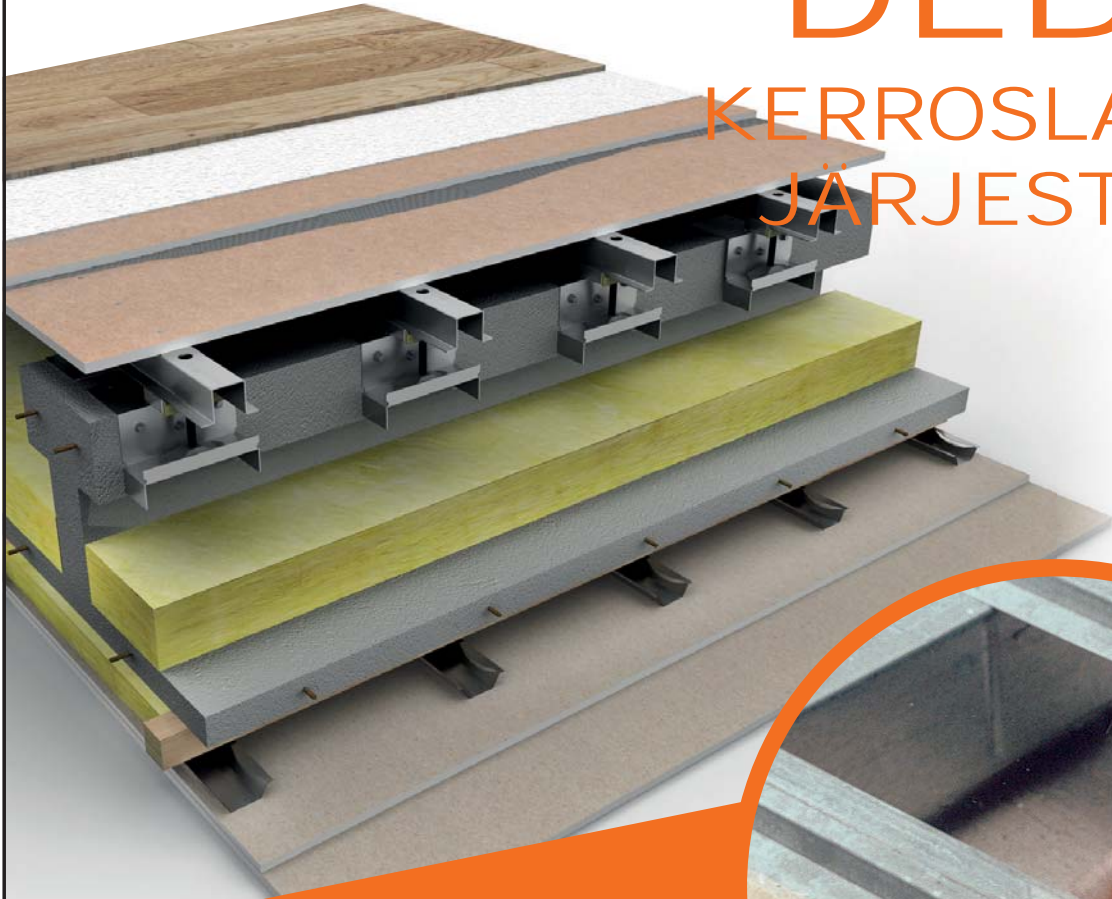
Oikea lämpö oikeaan paikkaan -ajattelu tarkoittaa miellyttävän sisäilmaston luominen kotiin tai muuhun oleskelupaikkaan – lämmön ja ulkoisen ilmeen avulla. Radiaattoreiden muotoja, väriä ja kokoa voi vaihdella tarpeen mukaan. Oikeat lämmitysratkaisut lisäävät sairaaloiden, hotellien, asuinrakennusten, julkisten rakennusten ja koulujen viihtyisyyttä. Sisäilma ja paljolti nimenomaan lämmitys vaikuttaa meihin enemmän kuin tiedostammekaan. Myös tekniset näkökohdat on otettava huomioon – esimerkiksi sairaaloissa radiaattoreiden on oltava hygieenisinä.

PURMO 
clever heating solutions

S A F A

DEBEL

KERROSLATTIA- JÄRJESTELMÄ



**Erinomainen rakenneratkaisu mm.
korjauskohteisiin**

- Kustannustehokasta ja nopeaa rakentamista
- Ei lisäkosteusrasituksia muille rakenteille
- Testattu kokonaisrakenne, joka täyttää mm. palo-, ääni ja esteettömyysvaatimukset
- LVIS asentaminen järjestelmän alla olevaan ontelotilaan

MAAILMA TARVIKSEE LUOTETTAVAN, NOPEAN JA YKSINKERTAISEN TAVAN MITATA SISÄILMAN EPÄPUHTAUKSIA



SISÄILMAN TOKSISUUTTA VOIDAAN SELVITTÄÄ UUDELLA ANALYYSILLÄ JA NÄYTTEEN- OTTOMENETELMÄLLÄ

Suomessa käytävä keskustelu rakennusten kosteus- ja mikrobivaurioista ja niiden vaikutuksesta ihmisiin käy kuumana. Puutteena ovat olleet nopeat ja edulliset biologiset menetelmät, joilla voidaan osittaa ajoissa sisäilman mahdolliset haitalliset vaikutukset. Sisäilman terveysriskin todentamisen jälkeen kyseinen "saastunut" kohta voidaan korjata ja siten estää huonon ilman aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset ja oireilu.

Sisäilmatutkimuspalvelut Elisa Aattela Oy on kehittänyt sisäilman näytteenottomenetelmän, jossa teräslaatikon (E-keräin) sisälle sijoitetulla hiilihappojäällä saadaan nopeasti ja standardoidusti kerättyä sisäilmasta vettä. Yhteistyötä on tehty 2014-2015 Turun ja Helsingin Yliopistojen kanssa, jotta saadaan näyttöä nopeasta ja näyte luotettavasti kerättyä sisäilmasta, sekä tehtyä vedestä sisäilman kokonaistoksisuusanalyysit laboratorioissa.

Menetelmää testattiin 30:ssä todellisessa vauriokohteessa syksyllä 2015. Identtiset näytteet toimitettiin molemmille yliopistoille ja Turku teki analyysit kehittämällään E.coli-lux -bakteerilla ja Helsinki teki testit siansiirtötestillä. Tulosten ollessa yhteneväiset voitiin jatkaa kaupallisella toiminnalla 2016 kymmenen yrittäjän voimin ympäri maata ja analyysit tehtiin Turussa.

Vuonna 2008 perustettiin Tampereelle kansainväliset laatuvaatimukset täyttävä solututkimus- ja testauslaboratorio FICAM www.ficam.fi, jossa loppuvuodesta 2016 ajettiin sisään **sisäilman toksisuusanalyysit** testaus ihmis-soluilla.

Uusien testien innoittamana teimme yhteistyössä syksyllä 2016 Suomessa maailman ensimmäisen uusien rakennusten sisäilman laadun tutkimuksen. Halukkaita uusien omakotitalojen omistajia ilmaantui 26. Näistä rakennuksista kerättiin huurrevesinäytteet ja analyysit tehtiin kahdella ihmissolulla, immuunisolu makrofagi- ja yleisellä sidekudossolulla fibroblastisoluilla FICAMissa. Tulokset osoittivat, että myös uusien rakennusten sisäilmassa on jotain, joka vaikuttaa haitallisesti testisolujen toimintaan. Tulokset jaettiin kohteille toukokuun puolivälissä 2017.

Helmikuussa 2017 Texasin Yliopisto halusi osallistua sisäilman laadun tutkimukseen huurrevesinäyttein ja suomalaisella analyysilla. FICAMin tulokset valmistuivat huhtikuussa 2017.

Huurrevesinäytteiden ja analyysien kehitystyötä tehdään myös Aalto Yliopistolla Tekesin rahoittamassa Sisäilmapoliisi-hankeessa sekä SIBI-hankeessa, jossa siivousaineiden ja biosidien tutkiminen huurrevesinäytteistä alkaa 1.9.2017.

Tampereen Ammattikorkeakoulun kanssa on Aerosolihallinta-tutkimushanke, joka pyrkii selvittämään mitä kaikkea huurrevedestä voisi löytyä.

Olemme allekirjoittaneet tutkimusyhteistyösopimuksen Tampereen Yliopiston Lääketieteen ja biotieteiden tiedekunnan kanssa 1.6.2017 liittyen siihen, että huurrevesinäytteiden analyysit tehdään ihmissoluilla FICAMissa.

Lisätietoja Sisäilmatutkimuspalvelut Elisa Aattela Oy.

Kaikkien yhteistyöyrittäjien yhteystiedot löytyvät www.sisailmatutkimuspalvelut.fi

Sisäilmäyhdistyksen
tapahtumia



SISÄILMATIETOA PORVOON MITALLA

Sisäilmapaja9

PORVOO 15.-16.11.2017



SISÄILMASTOSEMINAARI
15.3.2018
Helsingin messukeskus

2018 **ROOMVENT**
VENTILATION 

ESPOO, FINLAND JUNE 2-5 2018



SISÄILMAYHDISTYS

sisailmayhdistys.fi/tapahtumat



Mihin puu pystyy

Stora Enson avoimet rakennusjärjestelmät perustuvat CLT:n tai LVL:n ja muiden puupohjaisten rakennusmateriaalien käyttöön. Tarjoamme asiakkaillemme kilpailukykyiset ratkaisut ja mahdollistamme helpon, turvallisen ja vastuullisen puurakentamisen määrän kasvattamisen. Tutustu suunnittelun työkaluihin: www.storaenso.com/buildingsystems



Sisäilmakeskus



Rakennusterveys on ammattimme.

Palveluihimme kuuluvat pätevyityneiden asiantuntijoiden tekemät

- lähtötilanneselvitykset, arviokäynnit ja tutkimussuunnitelmat
- kosteus- ja sisäilmatekniset kuntotutkimukset
- rakennusfysikaaliset mittaukset
- sisäilmastonselvitykset
- haitta-ainetutkimukset
- talotekniset (LVI) kuntotutkimukset
- korjaustarveselvitykset, korjaussuunnittelu ja korjaustyön valvonta
- laadunvarmistuskokeet korjaus- ja uudisrakentamiskohteissa
- sisäilmatyöryhmätoiminta

Ota yhteyttä ja anna meidän auttaa!

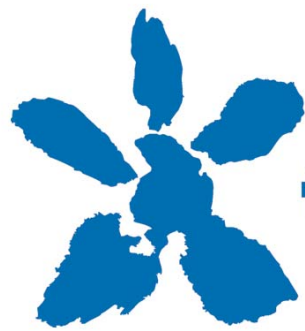
Suomen Sisäilmakeskus Oy

p. 020 740 2540

info@sisailmakeskus.fi

www.sisailmakeskus.fi

Helsinki Lahti Tampere Kuopio Joensuu



terveysilma

SYK

UNIVERSITY
PROPERTIES OF
FINLAND LTD

Presents

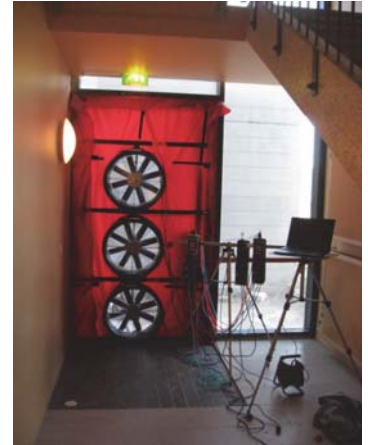
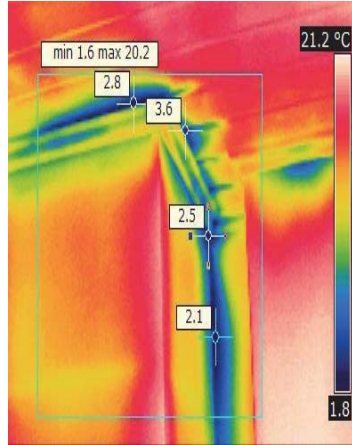


**In Kampusareena at TUT
Join us!
Participate. Arrange.
Meet the bright minds!**

Miksi mitataan ilmanpitävyyttä?

- Suuri energiansäästöpotentiaali
- Sijoitus terveelliseen sisäilmaan
- Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden varmistaminen
- Saat rakentamiseen sijoittamallasi rahalle vastinetta!

ILMANPITÄVYYSLUOKITUS		n ₅₀ -LUKU
≤ 0,6	A	
0,7 - 1,0	B	
1,1 - 1,5	C	
1,6 - 2,0	D	
2,1 - 3,0	E	
3,1 - 4,0	F	
≥ 4,1	G	



Laadunvarmistusta ilmanpitävyyssmittauksilla!



Miksi Dimensio Oy?

- yli 10 vuoden kokemus, yli 3000 ilmanpitävyyssmittausta
- BlowerDoor -laitteiden maahantuojana ja jälleenmyyjänä tarjoamme aina kehittyneimmät laitteet
- Kansainväliset yhteistyökumppanit
- VTT-sertifioitu tiiveyden mittaaja
- Valmius kaikenkokoisten kohteiden mittaamiseen

Dimensio Oy tarjoaa

- Mittaukset EN ISO 9972:2015 mukaisesti kaikenkokoisissa kohteissa, jopa >100.000m³
- Mittaukset haluttuna aikana, myös viikonloppuisin tai yöaikaan
- Ilmanvuotokohtien paikallistaminen lämpökameralla, savulla tai anemometrillä
- Työnaikaiset tarkastukset rakennusvirheiden välttämiseksi
- Kattava mittausraportti, jossa mukana mm. rakennuksen ilmanvuotoluku ja kuvallinen ilmanvuotokohtaluettelo



S u u n n i t t e l u t o i m i s t o D I M E N S I O O Y

Sentnerikuja 3A | 00440 Helsinki | gsm. +358 503362015 | ingo.achilles@dimensio.org | www.dimensio.org

SISÄILMASTON LAADUN EDELLÄKÄVIJÄ

Laatua sisäilmastoon alan parhailta osaajilta. Ratkaisut suunnitteluun, tutkimiseen, toteutukseen ja seurantaan.

- Kokonaisuuden hallinta
- Tutkimukset
- Korjaussuunnittelu
- Rakennusautomaatio
- Rakentamisen työnaikainen laadunvarmistus
- Viestintä
- Terveyshaittojen arvioinnit ja käyttäjäkyselyt

TULE TAPAAMAAN SWECOLAISIA OSASTOLLE 15!

WWW.SWECO.FI

SWECO 

 **TAMPEREEN TILAKESKUS LIIKELAITOS**



**Toimiva kokonaisuus mittalaitteita,
osaamista ja palvelua.**

www.teknocalor.fi

24/7

≡ TERMATER
— *Elementit* —

THERMISOL ON TÄYNNÄ LAATUA.

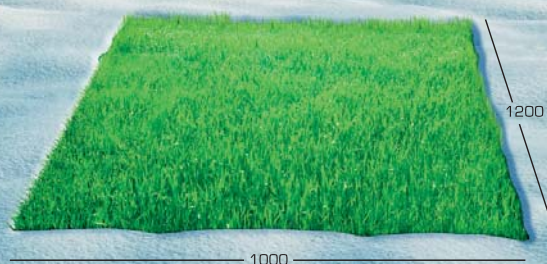
PELKKÄ CE-MERKINTÄ
EI ENÄÄ RIITÄ.

THERMISOL ELEMENTIT TÄYTTÄVÄT
KAIKKI UUDET STANDARDIT.

THERMISOL EPS-ERISTEET EIVÄT HOMEHDU.



ROUTA-LEVYILLÄ ON PARAS FTCI1-LUOKITUS.



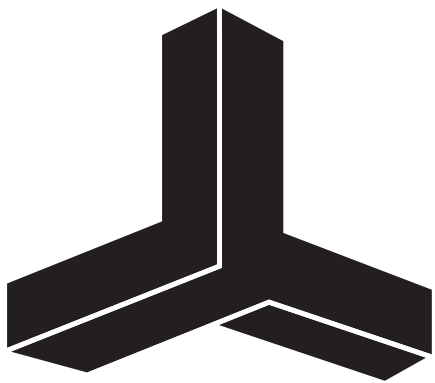
LATTIAERISTEET OVAT TUTKITUSTI PAINUMATTOMAT.



Lue lisää: thermisol.fi

ThermiSol

ThermiSol Oy | Toravantie 18, 38210 Sastamala | Puh. 010 8419 222



tremco illbruck

illbruck
making it perfect.

Liimaus- ja tiivistystuotteet
sisälle ja ulos, ikkunoihin ja
julkisivuihin.

TREMCO
Lasting Performance

Lattia-, vedeneristys- ja
rakennelasitustuotteet.

Nullifire
Smart Protection

Tuotteet passiviseen
palontorjuntaan.



TURKU AMK

TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES



Rakennustuotteiden akkreditoidut äänitestit

Ilmaääneneristävyys
Seinät, katot, ovet ja ikkunat

Axe-Tech Oy:n moduliväliseinä ilmaääneneristävyys testissä.



Äänenabsorptiosuhde

Akustiikkalevyt ja eristeet

Kurki Decoration Oy:n Hyssny-
akustiikkatauluja äänenabsorptio-
testissä.



FINAS
Finnish Accreditation Service
I046 (EN ISO/IEC 17020)
(Tyyppi A / Type A)

Turku AMK on FINAS-
akkreditointipalvelun
akkreditoima testauslaboratorio
T293, akkreditointivaatimus
SFS-EN ISO/IEC 17025.

**Toimitukset äänen
nopeudella.**

**Turun ammattikorkeakoulu
Akustiikkalaboratorio**



Turun yliopisto
University of Turku



Rakennusten ja tilankäyttäjien
kosteus- ja mikrobivauriotutkimus

TURUN YLIOPISTO | Biodiversiteetti

AEROBIOLOGIAN YKSIKKÖ

Asumisterveysasetuksen mukaiset
mikrobi- ja kuituanalyysit.

Homehtumisaltiustutkimukset.

Ulkoilman siitepöly- ja
itiöpitoisuuksien seuranta.

Mikrosienten tunnistus-
kurssit.

**Rakennusmikrobiologista tietotaitoa
jo yli 25 vuoden ajalta. Terveyden-
suojelulain (763/1194) mukainen
hyväksyntä.**

Kliininen tutkimusyksikkö TROSSI

- kansanterveystieteen laitoksen
työterveyshuollon ja ympäristölääketeen
oppiaineen ja biokemian laitoksen
Immunokemian laboratorion yhteistyönä

- työ- ja elinympäristön mikrobiologisten,
kemiallisten ja fysikaalisten altisteiden
terveysvaikutusten tutkimus

- lääketieteelliset, kliinifysiologiset,
immunologiset ja toksikologiset
menetelmät

- sähköiset oirekyselylomakkeet
- liikkuva näytteenottoyksikkö
- kliinisten näytteiden (veri- ja virtsa/ulostenäytteet) keräys ja yksinkertaiset keuhkofunktio mittaukset työpaikoilla (PEF, spirometria, uloshengitysilman NO-mittaus).
- toksisuusmittaukset laskeutuneesta pölystä ja ilmanäytteistä, vertailu viljelynäytteisiin
- riskinarviointi ja lausunnot

www.utu.TROSSI

<http://www.utu.fi/fi/yksikot/med/yksikot/tyoterveyshuolto/trossi/Sivut/home.aspx>

uponor

**Olemme tutkiva
insinööri-toimisto.**

**Tarjoamme
ratkaisuja
vuosikymmenten
kokemuksella.**

VAHANEN

VAHANEN-YHTIÖT
Vahanen Rakennusfysiikka Oy
020 7698 698
www.vahanen.com

Luotettavat ja tarkat mittalaitteet ilmanvaihdon sovelluksiin



HMD82

Kanavasensori

RH, kastepiste,
entalpia, T,
märkälämpötila



MI70

Käsimittalaite

RH, T, CO₂



GMW90

LEED- ja vastaaviin projekteihin

CO₂, RH, T



HMT120

Laboratorio- ja puhdistiloihin

RH, T

GMW80RD

Tarpeenmukaiseen ilmastointiin

CO₂, RH, T



HMW88

Märkätiloihin

RH, kastepiste, T

HMP110

Rakennekosteus- mittapää

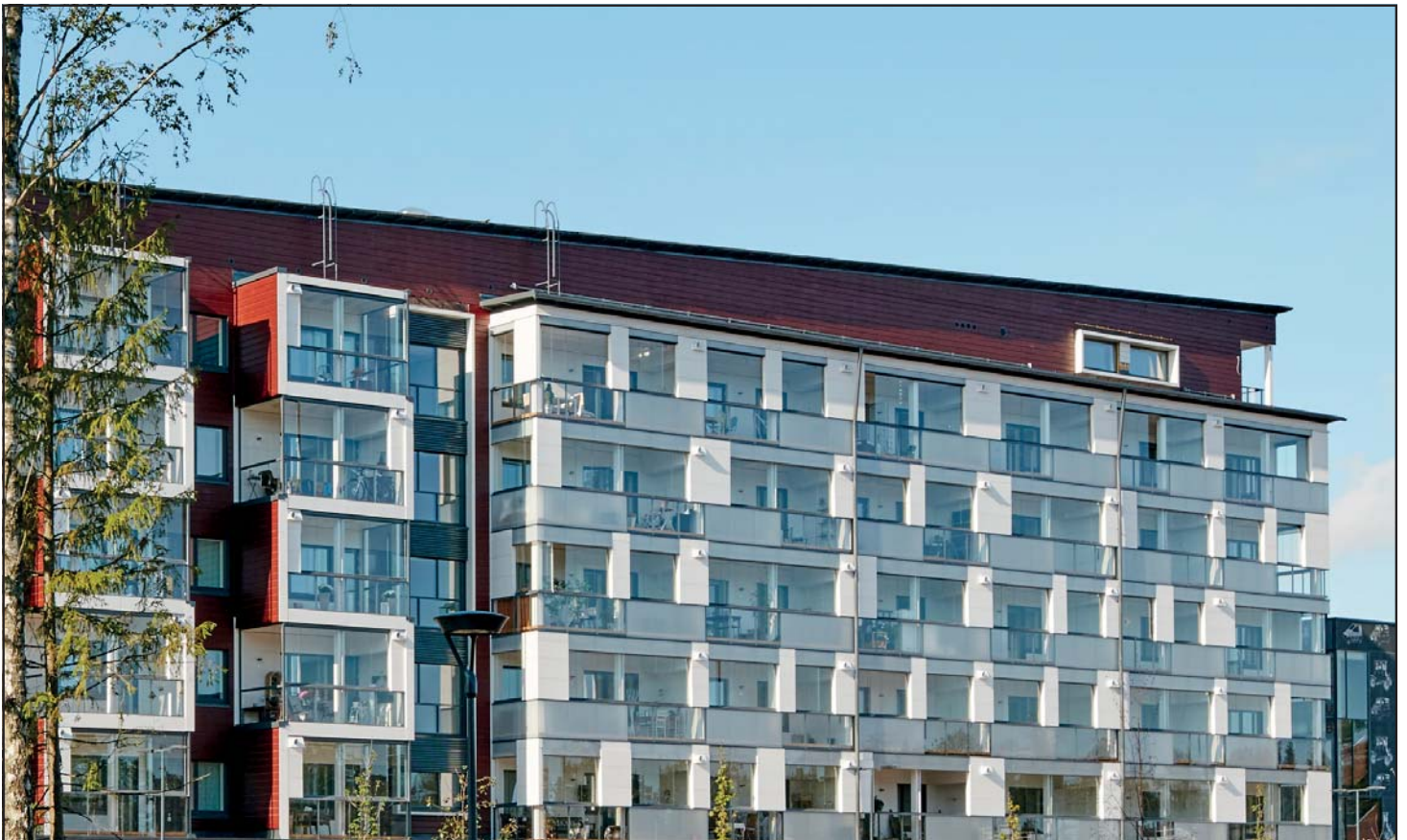
RH, T



VAISALA

(09) 8949 3000
myynti@vaisala.com

 **Online Store**
store.vaisala.com



HAJAUTETTU ILMANVAIHTO on avain asumisviihtyvyyteen

Isonkin asuintalon asukkaat pitävät ilmanvaihtoa miellyttävänä ja huomaamattomana, jos se mukautuu erilaisiin tarpeisiin perheen koon, työaikojen ja muiden elintapojen mukaan.

Lämmitetty tuloilma ja asukkaan mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihdon tehoon omassa asunnossaan lisäävät tyytyväisyyttä — aivan kuin omakotitalossa.

Huoneistokohtainen ilmanvaihto on mahdollista toteuttaa myös vanhaan kerrostaloon, kustannus-
tehokkaasti esim. linjasaneerauksen yhteydessä.

Valitse Vallox ja hengitä vapaasti



HAJAUTETTU ILMANVAIHTO ON AVAIN ASUMISVIIHTYVYYTEEN

VALLOX
HOME of FRESH AIR



**Lataa
esite**

VALLOX
HOME of FRESH AIR

www.vallox.com

The background of the advertisement is a photograph of a construction site. Several tower cranes are visible against a cloudy sky. In the foreground, a person's hands are shown holding a yellow and black moisture meter, pointing it towards the camera. The person is wearing a dark jacket and an orange safety vest.

WIISTE

Rakenteiden elinkaaren mittainen kosteudenhallinta ammattilaisille!
Kosteusmittaukset - Kosteudenhallinta - SolidRH-järjestelmä

WWW.WIISTE.COM

WIISTE OY
TIILIRUUKINKATU 22
33200 TAMPERE

SITOWISE