

RAKENNUSFYSIKKA 2021

Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut

26.– 28.10.2021, Tampere

Osa 1

Toimittajat Juha Vinha & Tuomas Raunima

Painopaikka:
Grano Oy
Jyväskylä 2021

ISBN 978-952-03-2145-1

Esipuhe

Edellisen rakennusfysiikkaseminaarin jälkeen on maailmassa tapahtunut paljon. Koronavirus on muuttanut käyttäytymistämme ja työntekoamme monella tapaa - jopa pysyvästi. Pitkään oli epäselvää voimmeko järjestää tätä rakennusfysiikkaseminaariakaan fyysisenä tilaisuutena tänä vuonna. Onneksi rokotukset virusta vastaan ovat edenneet niin hyvin, että syyskuussa saimme tiedon mahdollisuudesta järjestää tapahtuma perinteisellä tavalla.

Uusia tuulia on ollut ilmassa myös seminaarin järjestelyjen osalta. Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmä järjestää tapahtuman nyt ensimmäistä kertaa yhteistyössä Kiinteistöalan Koulutuskeskus Oy Kiinkon kanssa. Haluan kiittää aiempaa yhteistyökumppaniamme RILiä monivuotisesta yhteistyöstä seminaarin järjestämisessä. Seminaari on tänä aikana kasvanut yhdeksi suurimmista rakennusalan ammattilais tapahtumista Suomessa. Haluamme jatkossa laajentaa seminaarin osallistujakuntaa enemmän myös rakennusten omistajiin, rakennuttajiin ja isännöitsijöihin, jotta rakennusfysiikasta, sisäilman olosuhteiden hallinnasta ja ilmastomuutoksen vaikutuksista voidaan jakaa heillekin paremmin lisätietoa.

Rakennusfysiikkaseminaari järjestetään nyt seitsemännen kerran. Tällä kertaa järjestelyt ovat olleet poikkeuksellisen haastavat, koska toteutus on tehty hyvin lyhyellä aikataululla ja samalla on jouduttu varautumaan koko ajan mahdollisiin rajoituksiin tilaisuuden järjestämien osalta. Jotta tilaisuus voidaan järjestää perinteiseen tapaan ja saadaan kaikille mahdollisimman turvalliseksi, osallistujia pyydetään näyttämään myös koronatodistus tapahtumaan ilmoittautumisen yhteydessä. Näistä lähtökohdista pidän tämänkertaisen tapahtuman ohjelmaa ja toteutusta erittäin hyvänä ja toivon, että myös osallistujat ovat siihen tyytyväisiä.

Seminaaripäivät on jaettu tutuksi tulleella tavalla eri aihepiirejä koskeviin teemoihin. Ensimmäisen päivän aiheet liittyvät rakennusfysiikan suunnitteluun ja toteutukseen, rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, koulutukseen ja uusiin ohjeisiin. Toisena päivänä keskitytään perinteiseen tapaan rakennusten kosteus- ja homeongelmiin, niiden ennaltaehkäisemiseen ja sisäilman laatuun. Samana päivänä esitellään myös rakennusfysiikan laskentatarkastelujen sekä laboratorio- ja kenttätutkimuksen tuloksia. Kolmannen päivän aihepiirinä ovat erityisesti vähähiilinen ja luonnonmukainen rakentaminen, akustiikka sekä materiaalit ja pinnoitteet. Kaiken kaikkiaan seminaarissa kuullaan lähes 80 puheenvuoroa.

Tampereen yliopiston tutkimuksissa painottuu nyt entistä enemmän kokeelliset tutkimukset, koska rakennusfysiikan tutkimusryhmä on kehittänyt viimeisten vuosien aikana voimakkaasti kokeellisia tutkimusmenetelmiä ja -laitteita. Kokeellinen tutkimus on tärkeää, jotta voidaan varmentaa laskennallisella mallinnuksella saatuja tutkimustuloksia. Rakennekokeissa on keskitytty erityisesti ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen aiheuttamien rakenteellisten muutosten vaikutusten tarkasteluun todellisissa rakenteissa. Entistä enemmän tutkimusta tehdään myös kestävien ja luonnonmukaisten materiaalien parissa.

Seminaarissa kuullaan tällä kertaa neljä keynote-puheenvuoroa. Seminaarin avauspäivänä tiistaina keynote-puheenvuoron pitää professori Carsten Rode Tanskasta, joka on aktiivinen rakennusfysiikan kehittäjä maailmalla. Hän on toiminut mm. kansainvälisen rakennusfysiikan yhdistyksen puheenjohtajana sekä tänä kesänä Tanskassa pidetyn kansainvälisen rakennusfysiikan konferenssin puheenjohtajana. Hän toimii myös seuraavan pohjoismaisen rakennusfysiikan konferenssin puheenjohtajana v. 2023.

Tiistain toisen keynote-puheenvuoron pitää professori Targo Kalamees. Hän on kehittänyt aktiivisesti rakennusfysiikan tutkimusta Virossa viime vuosina ja toiminut useiden väitöskirjojen ohjaajana tältä aihealueelta. Hänen tutkimusryhmänsä on tällä hetkellä yksi aktiivisimmista uuden tutkimustiedon julkaisijoista maailmalla. Hän on toiminut myös useiden konferenssien puheenjohtajana, ja hän toimi puheenjohtajana myös edellisessä pohjoismaisessa rakennusfysiikan konferenssissa, joka pidettiin ensimmäistä kertaa Virossa v. 2020.

Keskiviikon keynote-puheenvuoron pitää professori Heidi Salonen, joka on tehnyt pitkäjänteisesti sisäilman laadun parantamiseen tähtäävää tutkimus- ja kehitystyötä. Hänellä on Aalto-yliopiston lisäksi professuuri myös Queenslandin teknillisessä yliopistossa, Australiassa. Hänellä on myös useita kansallisia ja kansainvälisiä luottamustehtäviä tältä tutkimusalueelta.

Torstain keynote-luennoitsija professori Fionn Stevenson Iso-Britanniasta on kuuluisa arkkitehti, joka on ottanut voimakkaasti kantaa ilmastonmuutoksen ehkäisemiseen sekä kestävään ja vähähiiliseen rakentamiseen liittyvissä asioissa. Hän on toiminut akateemisissa viroissa useissa Ison-Britannian yliopistoissa ja vierailevana professorina Kanadassa ja Puolassa.

Kosteusturvallisen rakentamisen palkinto jaetaan seminaarin yhteydessä viidettä kertaa. Tällä kertaa palkintoa tavoitteli 12 kilpailuehdotusta, joista viisi tuomariston mielestä ansioituneinta ehdotusta esitellään voittajaehdokkaiden sessiossa. Mukana on jälleen ehdotuksia usealta eri kosteusturvallisen rakentamisen osa-alueelta. Voittajaehdokkaina esitellään betonirakenteiden kuivumiseen liittyvä arviointityökalu, ilmaputkiin perustuva rakenteiden kuivatusmenetelmä, kosteusturvalliseen rakentamiseen tähtääviä ohjeita sekä uudenlaisen kosteusmittausanturi. Voittaja julistetaan taas ehdokkaiden pitämien esitysten jälkeen keskiviikkona iltapäivällä ennen cocktailtilaisuutta.

Haasteellisesta tilanteesta huolimatta yhteistyökumppanit ovat lähteneet mukaan tapahtumaan kiitettävällä tavalla. Uutena konseptina tapahtumaan otettiin mukaan myös muutama pääyhteistyökumppani, joiksi tulivat tällä kertaa Ardex Oy, Ramboll Finland Oy ja Vahanen Oy.

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

Tampereella 14.10.2021

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

Rakennusfysiikka 2021 -seminaarin yhteistyökumppanit

Seuraavat organisaatiot ovat toimineet Rakennusfysiikka 2021 -seminaarin yhteistyökumppaneina:

Päyhteistyökumppanit

Ardex Oy
Ramboll Finland Oy
Vahanen-yhtiöt

Yhteistyökumppanit

Abresto Oy Ab
A-Insinöörit
Akukon Oy
AX-Suunnittelu Oy
Bang & Bonsomer Group Oy
Bauroc
BMI Icopal
Christian Berner Oy
Climate Neutral Energy Systems and Society
CNES research platform
COMSOL Oy
Consti Oy
Dimen Oy
EHTA Talot Oy
Eriman Oy
Finnfoam Oy
Hunton Oy Ab
IdeaStructura Oy
Indoor Air Quality ecosystem – IAQe
Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy
Insinööritoimisto Sulin Oy
ISO-Chemie GmbH
Jaatimet Oy
Katuse Profid Oy
Kera Group Oy
Kingspan Insulation Oy
Knauf Oy
MATOlog/ Mato Engineering Oy
Metropolia AMK

Parmaco Oy
Pietiko Oy
Pihla Group Oy
Rakennusinsinöörit- ja arkkitehdit RIA
Rakennuslehti
Rakennustarkastusyhdistys RTY
Rakennusteollisuuden Koulutuskeskus
RATEKO
RAKLI
Raksystems Group
Restart Oy
Rothoblaas SRL
SafeDrying Oy
Saint-Gobain Finland Oy
Sensorcell Oy
Sisäilmayhdistys
Sitowise Oy
Suomen Arkkitehtiliitto SAFA
Sweco
Tampereen Tilapalvelut Oy
Tectis Oy
Termex-Selluvilla/ Termex-Eriste Oy
Terveet tilat 2028
Tiivistalo/ Redi-Yhtiöt Oy
Timberfinder Oy
VILPE Oy
Wienerberger Oy
Wiiste Oy
Ympäristö ja Terveys-lehti

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 1

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2021 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
Keynotes	1
Some recent challenges and peculiarities in moisture practices and assessment of buildings <i>Carsten Rode</i>	3
Renovation of facades in Estonia - challenges and solutions in terms of building physics <i>Targo Kalamees</i>	25
A1. Rakennusten elinkaaritekniikka	37
Maanvastaisten seinärakenteiden sisäpuolissa korjauksissa käytettyjen suolankeräysrappausten pitkäaikaistoimivuus – seurantatutkimuksen tuloksia 16 vuoden jälkeen <i>Janne Sievola</i>	39
Rakennuksen teknis-taloudellisen-ilmastollinen elinkaaritarkastelu <i>Arto Toorikka</i>	45
Tuulivoimaloiden perustusten käyttöikä <i>Kiia Miettunen ja Leif Wirtanen</i>	51
A2. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus	57
Massiivibetonirakenteiden rakennuskosteudenhallinta ja toiminnan varmistaminen suunnitteluvaiheessa <i>Teemu Vanha-Viitakoski ja Topi Moisio</i>	59
Rakennusfysikaalisten testivuosien päivitystyö rakentamisen mitoitussääät (RAMI) -hankkeen osana <i>Anssi Laukkarinen, Teemu Jokela ja Juha Vinha</i>	65
Julkisivujen pitkäaikaisestävyden rasitusolosuhteet <i>Toni Pakkala ja Jukka Lahdensivu</i>	71
Betonirakenteiden riskit esiin erikoistutkimuksilla <i>Jukka Hietikko ja Pekka Friberg</i>	77
Kylmätilarakentamisen rakennusfysikaaliset tarkastelut <i>Santeri Tammi, Teemu Nyysönen ja Leif Wirtanen</i>	83

A3. Rakenteiden ja rakennusten lämpö- ja kosteustekninen toiminta	89
Rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arviointi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittausten sekä niistä koottavan tietokannan avulla <i>Anssi Laukkarinen, Pauli Sekki, Antti Mikkonen ja Juha Vinha</i>	91
Termorangan kylmäsilta-vaikutuksen määrittäminen <i>Andreas Linnell ja Ghada Al-Adulrazzaq</i>	99
Kutterinlastueristeisten ulkoseinärakenteiden koerakennuskokeet ECOSAFE-hankkeessa <i>Jaakko Hietikko, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	105
Mineraalivillaeristeisten ulkoseinärakenteiden koerakennuskokeet Future Spaces -hankkeessa <i>Eero Tuominen, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha</i>	111
Mineraalivillaeristeisten yläpohjarakenteiden koerakennuskokeet Future Spaces -hankkeessa <i>Eero Tuominen, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha</i>	117
A4. Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja hyvät työmaakäytännöt	123
Kokemuksia suunnittelun ja työmaan laadunvarmistuksen ohjauksesta kosteudenhallinnan näkökulmasta <i>Timo Turunen</i>	125
Paksun betonipalkin kuivattaminen ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä <i>Pasi Lehtimäki, Esa Tommola ja Pauli Sekki</i>	131
A5. Sisäilman olosuhteet ja laatu	137
Koneellisen yöilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun päiväkotijärjestelmissä <i>Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen, Maria Valkonen ja Juha Jokisalo</i>	139
Lämpöolosuhteiden hallinta sähkölämmityksellä lasiseinillä <i>Kari Nöjd ja Eero Kokkonen</i>	145
Toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat helsinkiläisissä kerrostaloissa <i>Juha Jokisalo, Sami Pajunen, Ilia Kravchenko, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen, Azin Farahani ja Natalia Korhonen</i>	151
Future Spaces -hanke tähtää sisäilman laadun parantamiseen korjauskohteissa <i>Juha Vinha ja Jari Erkkilä</i>	157
Tulevaisuuden tilat ja paremmat sisäilmasto-olosuhteet (Future Spaces) <i>Antti Souto, Timo Vuolle, Sami Musakka ja Lari Eskola</i>	163
A6. Rakenteiden home- ja kosteusvauriot ja korjaaminen	169
Korjaustavan valinta kosteusvaurioituneessa rakennuksessa <i>Janina Hakanen, Inari Weijo ja Timo Turunen</i>	171

Koulurakennusten sisäilmaston tyypilliset korjaustavat -hanke <i>Inari Weijo, Timo Turunen ja Jukka Lahdensivu</i>	177
Tiivistää vai kengittää? <i>Olli Teriö, Ilkka Räinen, Ulla Haverinen-Shaughnessy, Santeri Shroderius, Pentti Kuurola, Timo Kauppinen ja Mikko Salin</i>	183
Kylmien rakenteiden mikrobit – aliarvioimmeko niiden esiintymistä? <i>Anna-Mari Pessi, Sirkku Häkkinen ja Niko Lindqvist</i>	189
Kuntotutkimus korjaussuunnittelun pohjana <i>Aaro Kivelä, Hannu Fagerlund ja Riku Hyttinen</i>	195
A7. Kosteusturvallisen rakentamisen palkinnon voittajaehdokkaat	201
by2020 Betonin kuivumisaika-arvio - työkalu tarkempiin arvionteihin <i>Pauli Sekki, Pasi Marttila ja Mirva Vuori</i>	203
RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet uudistuu <i>Pekka Talaskivi ja Pekka Laamanen</i>	209
Kastuneen tiiliseinän kuivattaminen seinän sisään upottamalla asennetulla ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä <i>Esa Tommola, Pasi Lehtimäki ja Jouko Pakkanen</i>	215
Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen -ohje <i>Toni Mäki ja Mikko Koskivuori</i>	221
MATOlog mittausteknologia rakenteiden jatkuvatoimisessa mittauksessa <i>Marko Oikarinen, Janne Liponen, Jaakko Ala-Paavola ja Samuel Aulanko</i>	227
A8. Vähähiilinen ja energiatehokas rakentaminen	233
Sairaalarakennuksen vähähiilisyyden arviointi – Case Tammissairaala <i>Elli Kinnunen ja Elisa Lindqvist</i>	235
Asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentäminen betoniteknologian keinoin <i>Jukka Lahdensivu</i>	241
Kustannusneutraalit energiaremontit eri rakennustyypeissä <i>Janne Hirvonen, Juha Jokisalo ja Risto Kosonen</i>	247
Rakennukset materiaali- ja rakennusosapankkeina <i>Laura Majoinen ja Ville Mäntylä</i>	253
Hiilijalanjälki ja energiatehokkuus korjausrakentamisen hankkeiden suunnittelussa <i>Mika Keskisalo, Mikko Matveinen ja Jari Kuusisto</i>	259

A9. Luonnonmukainen rakentaminen	267
Honkasuon Aarraitat – perinteisin rakentein ilmastonmuutosta vastaan <i>Minna Aarnio ja Jukka Reinikainen</i>	269
Polttamattomat savituotteet osana vähähiilistä ja terveellistä puurakentamista <i>Mikael Westermarck</i>	275
Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden olosuhteissa <i>Antti Forss, Teemu Jokela ja Juha Vinha</i>	281
Kutterinlastueristeisten rakenteiden hiililaskennan tuloksia <i>Arto Saari, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	289
Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja sisäilmaemissioiden on-line havaintoja <i>Mirja Salkinoja-Salonen, Salla Venäläinen, Timo Hokkanen, Vesa T. Korhonen, Arto Visala, Panu Harmo ja Juha Vinha</i>	295
A10. Rakennuksen tiivistys ja ilmanvaihto	301
Syrjäytysilmanvaihdon mitoitus kevyillä ja raskailta rakenteilla <i>Natalia Lastovets, Risto Kosonen ja Juha Jokisalo</i>	303
Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron automaattinen mittaus ja säätö <i>Marko Björkroth ja Ismo Marin</i>	309
Korkean rakennuksen luonnollisten ilmavirtauksen hallinta ja hyödyntäminen <i>Ilari Ranta-aho</i>	315
Rakennuksen tiiviys ja ilmanvaihdon suunnittelun ohjeistus <i>Lari Eskola</i>	321
Teollisten mineraalikulitujen päästöjen tuotetestaus <i>Risto Koivusaari, Risto Hiukka ja Mikko Saari</i>	327
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	333

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 2

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2021 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
B1. Rakennusfysiikan koulutus ja juridiikka	335
Kosteus- ja mikrobivaurioiden korjaustavat oikeudessa <i>Tiina Koskinen-Tammi</i>	337
Akustiikkasuunnitteluun liittyvistä oikeudellisista kysymyksistä <i>Rauno Pääkkönen</i>	343
Sisäolosuhteiden kehittäminen eri toimijoiden yhteistyöllä <i>Timo Kauppinen, Ulla Haverinen-Shaughnessy ja Tapani Mäkikyrö</i>	349
B2. Rakennusfysiikan ohjeet	355
Muurattujen ja rapattujen julkisivujen kuntotutkimus <i>Toni Pakkala, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö, Antti-Matti Lemberg ja Matti Eronen</i>	357
Rakennusvalvontojen uudet käytänteet kosteusvaurio- ja sisäilmakorjauksiin <i>Olli Teriö, Tuire Sulkava ja Ulla Haverinen-Shaughnessy</i>	363
Betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden mittauksen päivitetty RT-kortti RT 103333 <i>Sami Niemi</i>	369
Rakennuksen sisäolosuhteiden toimivuuden varmistus <i>Timo Kauppinen, Pentti Kuurola, Ville Sormunen, Markku Hienonen ja Jarmo Lehto</i>	375
Tiiviiden asuntojen ja asuinrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohje <i>Lari Eskola</i>	381
B5. Laskennallinen mallinnus	387
Case-tutkimus: Tuulettuvan kaksoisjulkisivun lämpö- ja virtaustekninen laskennallinen tarkastelu <i>Petteri Huttunen, Andreas Limnell ja Antti Mikkonen</i>	389
Sisälämpötilan vaihtelun vaikutus ulkoseinärakenteen U-arvon nopeaan kentällä tehtävään mittaukseen <i>Ville Jokelainen, Petteri Huttunen ja Juha Vinha</i> <i>Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka</i>	395
Puurankaisten koeseinärakenteiden laskennallinen analysointi <i>Petteri Huttunen, Ville Jokelainen ja Juha Vinha</i>	401

Huonelämpötilan pysyvyys ja aktiivisen jäähdytyksen tarve tulevaisuuden ilmastossa <i>Risto Kosonen, Azin Farahani, Juha Jokisalo, Natalia Korhonen ja Kirsti Jylhä</i>	407
Keskisyvän energiakaivon vaikutukset asuinkerrostalokorttelin lämmitysratkaisuna <i>Santeri Siren ja Mikko Hasanen</i>	413
B6. Laboratorio- ja kenttätutkimukset	419
Sisäilman kosteuslisä palvelu- ja toimistorakennuksissa <i>Tuomas Raunima, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha</i>	421
Mineraalikitujen irtoaminen sisäkatosta – laboratorio- ja kenttämittauksia <i>Jyrki Kilpikari, Tapani Tuomi ja Henna Maula</i>	427
Rakennusten paine-eromittausten tulosten käsittely- ja esitystavat <i>Helena Noetzel</i>	433
Pintahygienian kehittäminen muuttuvassa epidemia-tilanteessa <i>Leila Kakko, Sami Oikarinen, Amirbabak Sioofy Khojine, Hanna-Greta Puurtinen, Kirsi-Maarit Lehto, Sampo Saari, Eija Reunanen, Anna Hyvärinen ja Heikki Hyöty</i>	439
Nopeat U-arvomittaukset koerakennusten ulkoseinärakenteissa <i>Jaakko Hietikko, Petteri Huttunen ja Juha Vinha</i>	445
B8. Ääneneristys ja meluntorjunta	451
Puuvälipohjien askelääni-projektin mittaustuloksia <i>Valtteri Hongisto, Jukka Keränen, Johann Laukka, Reijo Alakoivu, Jarkko Hakala ja Juho Virtanen</i>	453
Joustavien reunaliitosten vaikutus kiviainesisen laatan ilmaääneneristävyyteen <i>Jukka Keränen, Valtteri Hongisto ja Jarkko Hakala</i>	459
Melu ja VILP-laitteet <i>Rauno Pääkkönen ja Esa Nousiainen</i>	465
Puurakenteiden ääneneristävyyden nykyaikaiset laskentamenetelmät <i>Mikko Kylliäinen, Jesse Lietzén ja Ville Kovalainen</i>	471
Rakennuksen kelluttamisen suunnittelu – raideliikenteen runkomeluvaimennus <i>Timo Peltonen, Sakari Tervo, Jukka Pätynen ja Henri Penttinen</i>	477
B9. Akustiikkasuunnittelu	483
Lämmöneristeiden akustiset ominaisuudet <i>Valtteri Hongisto, Pekka Saarinen, Reijo Alakoivu ja Jarkko Hakala</i>	485

Akustiikkasuunnittelu Helsingin yliopiston päärakennuksen peruskorjaushankkeessa <i>Joose Takala, Mikko Kylliäinen, Ville Kovalainen ja Tuomas Pelli</i>	491
Akustiikkasuunnittelu rakennusten käyttötarkoituksen muutoksissa <i>Jussi Rauhala, Niko Manninen, Ville Kovalainen ja Mikko Kylliäinen</i>	497
B10. Rakennusmateriaalit ja pinnoitteet	503
Betonilattioiden pinnoittamisen ohjeistus <i>Leif Wirtanen</i>	505
Eräiden kutterinlastutuotteiden rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet <i>Ilkka Tuurala, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	511
Männyn, kuusen ja koivun antibakteeriset ominaisuudet ja pinnoituksen vaikutus <i>Tiina Vainio-Kaila, Olli Paajanen, Anti Rohumaa, Pertti Pasanen, Anna-Maria Veijalainen, Juha Takkunen, Martti Venäläinen ja Anni Harju</i>	519
Haitalliset POP-yhdisteet rakennusmateriaaleissa <i>Annu Ruusala, Sami Mustajoki ja Jussi Aromaa</i>	525
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	531

Keynotes

Some recent challenges and peculiarities in moisture practices and assessment of buildings

Professor Carsten Rode
Technical University of Denmark

Abstract

The paper explains about three topics of building physics research carried out by the author in some recent and past years. The following topics are dealt with:

- Experiences with MgO boards.

MgO boards became the most used material for sheathing in the years 2010-2014 before it was realized that they gathered water from ambient air, which caused disintegration of the boards themselves and damage to the adjacent building with salty water. We will account for some investigations of the boards.

- Interior insulation of solid brick walls.

There is great interest in adding thermal insulation to the solid brick façade walls of historic buildings, and it cannot always be permitted on the outside. Adding insulation on the inside is potentially a challenge with regards to moisture risk. This has been investigated in several projects, and we will communicate some of the experiences.

- Moisture modelling with hysteresis in sorption isotherms

Transient moisture models need the sorption isotherms to calculate the equilibrium between relative humidity and moisture content of materials. However, most models do not take into consideration that the equilibrium is not unique, since there can be significant differences between sorption curves for moisture uptake and drying – so a situation of hysteresis exists. What could be the implication for the results of moisture calculations and for subsequent assessment of mould risk?

1. Introduction

The present paper presents research from the past years on the three topics mentioned in the abstract. It combines in a short form information from previously published papers, e.g. [12], [15], [17], [18], [21] and [22].

2. Experiences with MgO boards

With narrated excerpts from [12] and [15].

2.1 Introduction

Magnesium oxide boards have been widely used on facades in Denmark during 2010-2014. However, the magnesium salts absorb humidity from the ambient, and they begin to leak salty water, which is highly corrosive, and leads to moisture and mould problems in wooden members of the structures. MgO-boards were not tested for their hygrothermal function before being used on exterior wall structures, which has had detrimental consequences, and an expected cost of repair of around 2 billion DKK (around 270 M€). Properties for moisture transport and retention have been determined and will be shown together with some examples of damaged structures.

Many moisture damages were observed in the winter 2014/15 in ventilated facades of new or newly renovated Danish buildings. The damaged facades had magnesium oxide-boards (MgO-boards) as sheathing facing the ventilated air gap behind the exterior siding. MgO-boards have often been used as sheathing behind a ventilated air gap as shown in Figure 2.1a and Figure 2.2a. A photo of an MgO-board is shown in Figure 2.1b. Examples of saltwater leaks and subsequent damage are shown in Figure 2.2b, 2.3a and 2.3b.

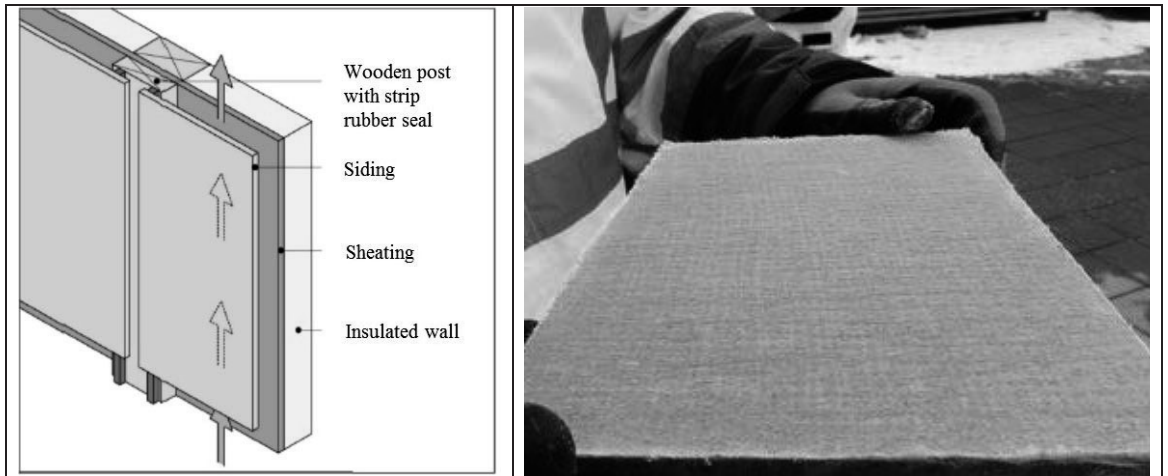


Figure 2.1. (a) Sketch of a typical façade where a sheathing board is used as wind barrier. Adapted from [1]; (b) Photo of 8 mm thick MgO-board with a glass fibre mesh on both surfaces. Source of (b) and photos in Figure 2.2 and 2.3: Tommy Bunch-Nielsen, Bunch Bygningsfysik ApS.

2.2 Chemical structure of MgO-boards

The binder in MgO-boards is formed by a chemical reaction between MgO and MgCl_2 , typically in a weight ratio of 2.5-3.5 parts MgO to one part MgCl_2 . The product is quite similar to Sorel cement, which was first produced by Stanislas Sorel in 1867 [2] and used as a flooring material. Various explanations about the product and its possible use and qualities can be found in literature [3-10]. The hydrated product is hard and strong but the product decomposes over time by contact with water or air at high relative humidity (RH). MgO-boards often have organic additions, such as sawdust, and inorganic fillers such as sand, lime or volcanic ash. Figure 2.4a shows a picture of an MgO-board from a stereo microscope at 10 times magnification. Figure 2.4b shows a microanalysis of a thin section of a specimen at 50 times magnification that reveals that the investigated MgO-board contains a high amount of very porous organic material, and a high number of fine spherical air pores. All investigated MgO-boards have glass fibre felt as facer.

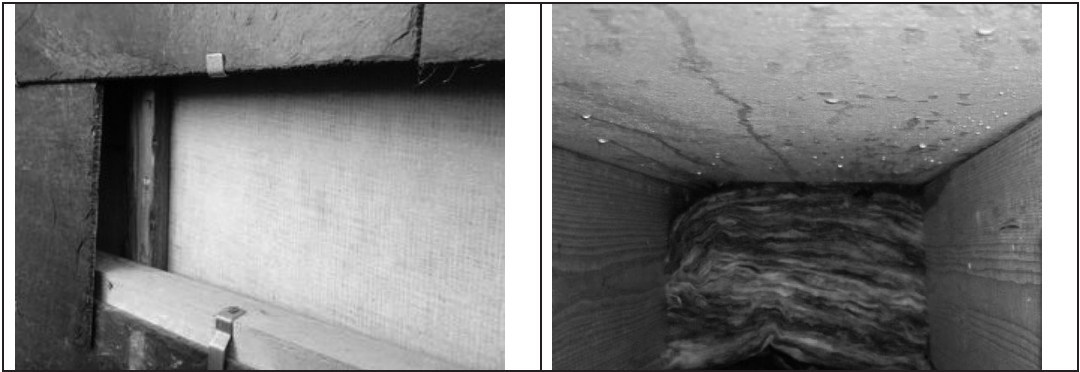


Figure 2.2. (a) The MgO-board is placed facing the air gap, which is behind the siding boards made of natural slates; (b) Salty water drops on a vertical MgO-board on the side that faces the insulation filled cavity inside the wall.



Figure 2.3. (a) Water drops containing chloride ions run down the vertical MgO-boards and drain out of the wall from behind the wall's siding boards; (b) Zink covering of the steel profile is corroded as a result of direct contact with salty leaked water from the adjacent MgO-board.

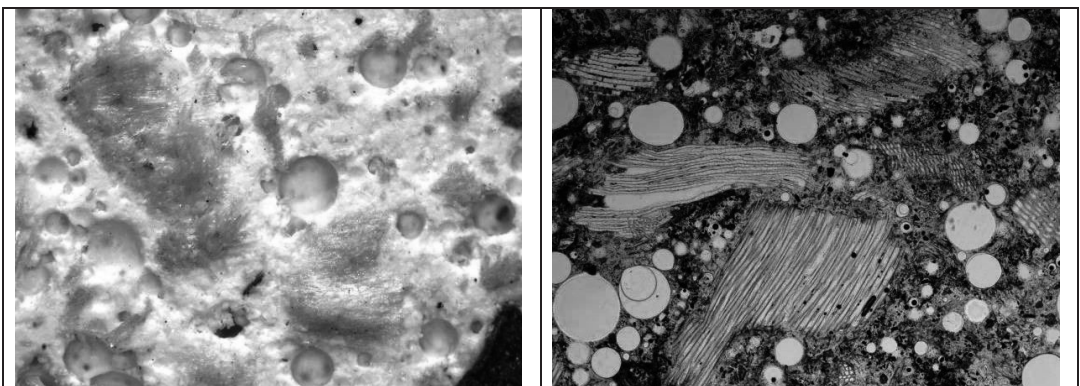


Figure 2.4. (a) Cut of a MgO-board investigated in a stereo microscope at 10 times magnification; (b) Micro analysis of a thin section of a specimen at 50 times magnification.

2.3 Initial tests of moisture absorption in MgO-boards from surrounding air

8 mm thick MgO-boards were collected from four different buildings and used for measurement of moisture absorption and desorption curves. The magnesium-to-chloride ratios by mass of the boards varied from 2.7 to 3.3.

Moisture absorption in MgO-boards from the surrounding air was measured at three different levels of relative humidity at 23 °C: 35% RH, 80% RH and 95% RH. Before start of the moisture exposure, samples of size 5 x 4 x 3 mm were dried at 105 °C for 4 days. MgO-samples with a total weight of about 2 g were put in a petri dish, which was placed in a Teflon basket, and weighed without removal from the climate chambers. The specimens were weighed after 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7 days and after 2 and 4 weeks. Specimens exposed to 35 % RH reached 6-7 % moisture content by weight after a week and then remained at that level, while specimens exposed to 80 % RH reached 26 % by weight after a week, and about 30 % after 4 weeks (48 % for one of the specimens). Results are presented in Figure 25 for specimens exposed to 95 % RH. Mould growth was seen after 30 days of exposure to 95% RH.

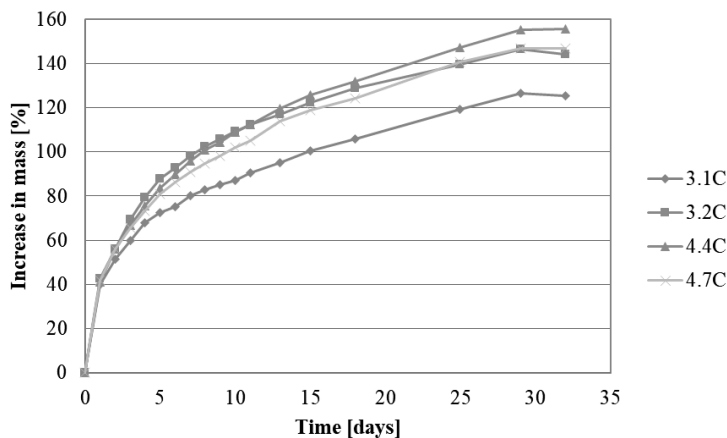


Figure 2.5: Course of the moisture retention at 95% RH.

2.4 Further absorption and desorption measurements

Subsequent measurements of absorption and desorption were performed for the same four specimens that were analysed for initial moisture absorption at 35% RH and 80% RH, i.e. the initial dry masses were known. Desorption was measured for the specimens that were originally used for determination of initial moisture absorption at 80% RH. Before starting the desorption runs, the humidity of the climate chamber was increased from 80% RH to 92% RH in steps of 2% RH with the purpose of finding the level of RH at which the specimens began to leak salty water from the surface (sweating). The first part of the tests (at 95% RH) had revealed that specimens show severe sweating after one week, while boards at 80% RH apparently did not sweat after 80 days of exposure. In view of the risk of mould growth at RH higher than 92% RH, desorption was started at this RH.

After equilibrium had been attained at 30% RH, drying of two of the specimens was performed at 105 °C, while the two other specimens were dried over magnesium perchlorate at room temperature. The purpose of the repeated drying by the end of the sorption tests was to see if the

dry masses were the same as before the measurements. The results were that one sample had lost 0.3% in dry weight, while the other three specimens saw dry weight losses of 12-15 %.

Absorption was measured for specimens that were originally used for initial moisture absorption at 35% RH. The absorption points were measured from 35% RH and up to 92% RH. An example of the results of the absorption and desorption measurements is shown in Figure 2.6.

2.5 RH where sweating starts on the outside of the MgO-boards

As described above, the RH was gradually increased from 80% RH to 92% RH in steps of 2% RH with the purpose to find out at which RH the MgO-board starts sweating. It must be stated that the specimens stayed more than 30 days at 80% RH before the humidity was increased to 82% RH. The results of this gradual increase in RH showed the initially sweating on the specimens' surfaces or in the cup below the specimens at 84% RH.

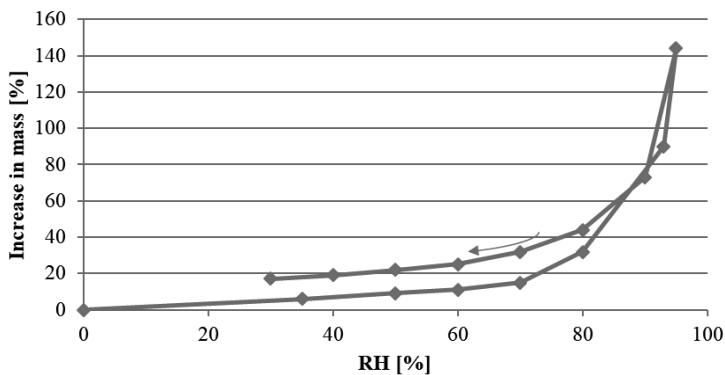


Figure 2.6: Results of the absorption and desorption measurements for one of the specimens.

2.6 Water vapour resistance for MgO-board

The water vapour diffusion resistance of 8 mm thick MgO-board has been measured according to EN 12572 [11]. Three different series were carried out: 1) A dry cup series 0/50% RH performed by use of silica gel inside the cups, 2) a wet cup series 50/85% RH with saturated potassium chloride solution in the cups, and 3) a wet cup series 50/93% RH with saturated potassium nitrate solution in the cups. The climate chamber was operated at $50 \pm 2\%$ RH at 23.0 ± 0.1 °C. The measured results are reported as water vapour resistance Z_p with respect to relative humidity, RH, and water vapour permeability δ_p with respect to relative humidity, RH, in Table 1. The measured water vapour resistances are relatively low, and similar to the water vapour resistance of gypsum board.

Table 1: Water vapour resistance Z_p with respect to relative humidity RH, and water vapour permeability δ_p with respect to relative humidity RH.

Condition °C - % RH	Water vapour resistance, Z_p [GPa·m ² ·s/kg]	Water vapour permeability, δ_p ×10 ⁻¹² [kg/(Pa·m·s)]
23 – 0/50	1.5±0.2	5.3±0.5
23 – 50/85	0.7±0.1	11.4±2.1
23 – 50/93	0.5±0.1	16.0±3.9

2.7 Analysis of ‘tear’ drops from an MgO-board

A 50 x 100 x 8 mm piece of MgO-board was stored horizontally inside a desiccator over water at room temperature. The relative humidity inside the desiccator was 95-100% RH. After about a week, the first drops were formed on the surface of the MgO-board. After 2½ weeks, the drops were collected and analysed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry and Ion Chromatograph equipment. The results are shown in Table 2.

Table 2: Amount of K+, Na+, Mg++ and Cl- ions in ‘tear’ drops from a MgO-board.

K+ [mg/litre]	Na+ [mg/litre]	Mg++ [mg/litre]	Cl- [mg/litre]
12237	4165	13733	40133

2.8 Corrosion

Salt from MgO-boards is highly corrosive on metal fasteners and profiles. Zink flashings of 0.8 mm corrode in 1- 2 years. Electro galvanized steel profiles, nails and screws will corrode through to the steel in 1-2 years. Aluminium alloys have different resistance against corrosion and the best alloys have been seen undamaged for 2-3 years. Stainless steel of A2 and A4 can be used without problems. When MgO boards have been sitting on a wooden structure, MgCl₂ salt will have been absorbed by the wood, which is then corrosive to metallic fasteners other than stainless steel.

2.9 MgO boards with Sulphate

More recently we have tested the composition and sorption characteristics of MgO boards with sulphate (MgSO₄) rather than chloride (MgCl₂). The sulphate based boards seem to have many of the same performances as the chloride based boards, but the sorption characteristics are different, and the point on the relative humidity scale, where the boards begin to sweat is higher, namely around 95% RH, see Figure 2.7. Other investigations of the two types of MgO boards are reported in [12].

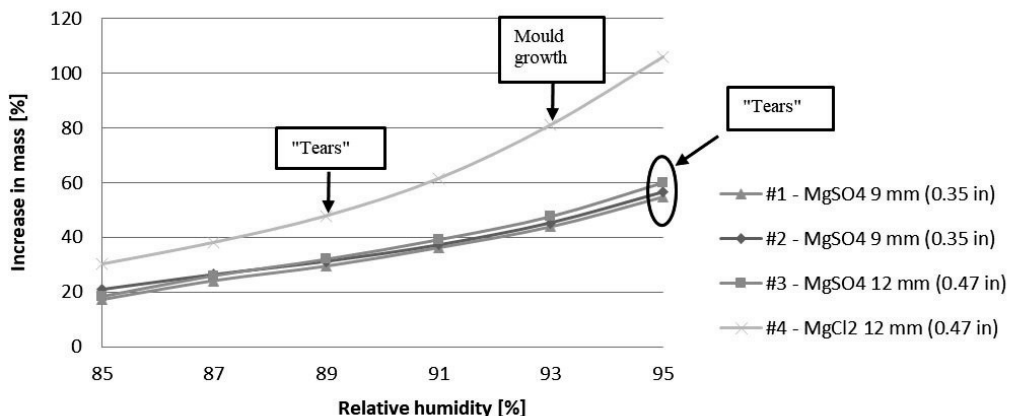


Figure 2.7 Moisture retention curve from 85% RH to 95% RH measured over the course of seven weeks. The increase in mass includes the weight of “tears”.

2.10 Discussion

The experiments described indicate that a relative humidity level of 84% RH is a limit above which the chloride based MgO-boards begin to absorb excessive amounts of moisture from surrounding air. Since this and higher values of relative humidity are typical in locations where exterior sheathing is used, it can be stated that such MgO-boards cannot be suitable products for this use. This is supported by the numerous examples of failures, which have been seen in recent years, where such boards leak salty water that cause damage on adjacent construction members of wood or metal, and which even over time lead to disintegration of the MgO-board itself. Information sheets exist both from Australia [13] and Denmark [14] that warn about the use of MgO-boards in humid environments.

2.11 Conclusion on MgO boards

It can be stated that MgO-boards are not suited as sheathing in exterior facades or any other application where the boards are in contact with a moist climate. At RH above approximately 84% RH the MgO-boards will form drops of salty water on the surfaces, and this water will be absorbed in wooden structures in connection with boards and water absorption will increase and can lead to mould growth on wood. The MgO-board itself is also sensitive to mould growth due to the content of organic material. Furthermore, the MgO board will itself also be disintegrated over time when it is exposed to high humidity due to the dissolution of the salts it consists of. If metal parts, such as galvanized steel, fasteners and flashings are in contact with MgO-boards, they will start to corrode within short time, leading to safety problems in the structure. Sheathing with MgO boards are now being replaced by other types of materials in a great number of buildings in Denmark. New boards based on MgSO₄ may have properties that make them less hygroscopic and susceptible to degradation, and it should be investigated if they can sustain use in climates like in the Nordic countries. A lesson learned is that moisture performance such as sorption should be a property to be critically assessed when new building products come to the market.

3. Interior insulation of solid brick walls.

3.1 Introduction

There is great interest in adding insulation to the solid masonry walls of historic buildings, which we still cherish and use today. From a building physics point of view, it is best to add the insulation on the outside, but many historic building are listed or worthy of preservation so outside insulation is not permissible, as it will change the outer appearance in a non-satisfactory way. This leaves interior insulation as the only possibility. But with interior insulation, the original wall gets colder and thus potentially more wet, and there could be a risk of moisture accumulation in the interface between the old masonry and the new insulation. This has been the topic of several research projects, including the European RIBuild project (2015-2020) [16].

Apart from the European project, a series of projects have been carried out in Denmark to test the applicability of interior insulation. This chapter will account for two of them, which have taken place at the Technical University of Denmark (DTU). The first one investigated different wall configurations in a full scale experiment of interior insulation to be used without vapour retarder. Since moisture contents found in the first project were often somewhat high, although mould was rarely seen, a follow up activity in the field and in the laboratory investigated conditions for avoidance of mould growth. Methods were studied for removing old mould infested render and

using glue mortar with high pH-value to fix the interior insulation on the brick wall. The following subsections are translations of information sheets for practitioners about the two coupled projects [17] and [18].

3.2 Research in new facility for investigating interior insulation without vapour barrier

New research shows that it is possible to insulate solid exterior walls inside without setting up a traditional vapour barrier. However, experiments indicate that both moisture that comes from outside and inside needs to be carefully taken care of to avoid critical moisture conditions and risk of mould growth.

Multi-storey buildings with very little or no insulation, which were built from 1851 to 1930, make up 41% of all multi-storey buildings in Denmark. In these buildings, addition of insulation to exterior facades is needed to reduce heat loss and save energy. Exterior insulation can frequently be used without problems. Sometimes, however, it is necessary to insulate from the inside, e.g. in buildings which are worthy of preservation. There has been great scepticism about interior insulation because a large number of moisture and mould damages have been found, particularly in solid brick walls. Damages may pose both health challenges for the residents and financial consequences for the owners. The problems have led to a great interest in new knowledge about moisture-proof methods in the renovation industry, both among manufacturers and importers of insulation systems and among designers and contractors.

3.2.1 Basis of the analysis

In order to find usable solutions, we must take a starting point in some basic building physical conditions (see Figure 3.1). When installing internal insulation, the temperature in the solid facade wall is reduced in winter, which means that the moisture level in the wall increases. The moisture increases the wall's thermal conductivity and thus the heat loss through the wall. In addition, increased moisture can lead to an increased risk of mould growth. In the worst case, there is a risk that a number of building damages may occur. It can e.g. be frostbite in the masonry or fungal infestation if wood is present.

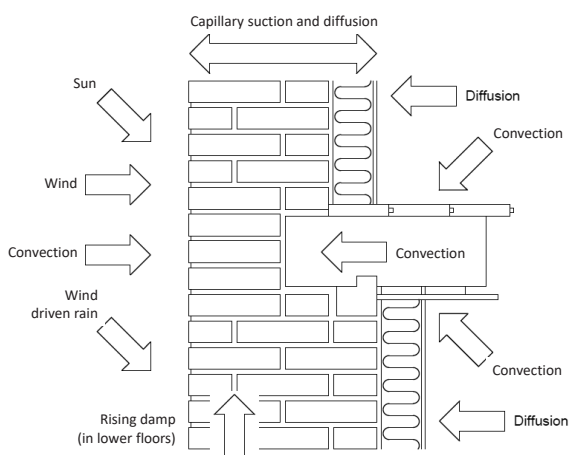


Figure 3.1: Impact of water and moisture on the internal and external surfaces of a facade wall

3.2.2 Comprehensive full-scale experiments

Since 2013, DTU has investigated how to use internal insulation materials without the use of a vapour barrier. In the experiment, insulating hydrophilic (water-friendly) materials were used, which was fully adhered to the inside of the original wall, so they became extensions of the wall. The material allows water diffusion in the same way as the existing wall, and possibly capillary water transport in the insulation material could suck the liquid water back towards the indoors, where it may balance the outward vapour drive.

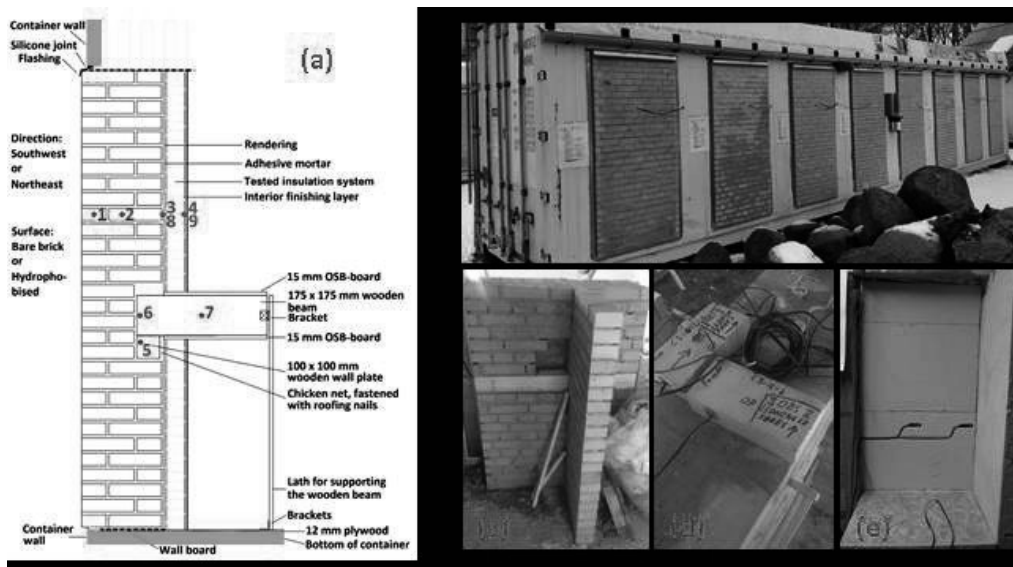


Figure 3.2 Test stand configuration: (a) Vertical section of a test wall, (b) External view of test container, (c) Test wall under construction with wooden wall plate and hole for beam end, (d) Sensor installation in bricks (sensor points 1 and 2), (e) Sensor installation in insulation near interior surface (sensor points 4 and 9).

The researchers have primarily concentrated on full-scale experiments in two 40-foot containers at DTU Civil Engineering with a controlled indoor climate. In the two containers, 24 wall samples had been built, each being 1x2 meters wide and high, and with one and a half stone thickness (36 cm). The walls were equipped with different interior insulation systems with varying parameters. In the project, insulation systems with the following materials were investigated:

- Foam concrete
- Lightweight concrete
- Calcium silicate
- Polyurethane boards with channels of calcium silicate mortar
- Insulating plaster with lime

For comparison, a traditional solution with mineral wool batts, plasterboard and vapour barrier was also investigated.

As variations, the exterior surface of the masonry wall were in some cases treated with a hydrofobing agent that would diminish the capillary water uptake in brick.

As Figure 3.2 illustrates, the walls were configured with a wooden beam end that rests in the wall

on a wooden wall plate. Moisture conditions were monitored in several places with main interest in the interface between the solid masonry wall and the interior insulation (point 3 in Figure 3.2a), in the wall plate (point 5), and in the beam end (point 6).

3.2.3 Results

The research results show some clear indications of how internal facade insulation in buildings with relatively high internal moisture levels works on facades with solid masonry:

1. For rather diffusion-tight insulation systems, such as polyurethane sheets with channels of calcium silicate mortar, the experiments show that the impregnation has a positive effect both summer and winter. In the case of diffusion-open materials, impregnation of the outer wall has a positive effect in summer and a negative effect in winter. In both cases, this applies both to the separating layer between masonry and interior insulation and to embedded wooden elements. When the indoor humidity is kept at a normal level (indoor climate class 2), impregnation has a positive effect on diffusion-open insulation systems, both summer and winter.
2. Exterior surfaces must be free of cracks and fissures, as the influence of water from the exterior has a great influence on the function of the interior insulation.
3. Internal surfaces must be carefully cleaned for organic material before installing the internal insulation. It is also safest to avoid using organic insulation materials such as wood fibre, cork and paper.
4. Simulations show that combining the impregnation of the exterior surfaces with methods to reduce the moisture impact from the indoor climate has a positive effect on the relative humidity in the critical separation layer between the masonry and the insulation system. For example in the form of balanced ventilation.
5. The experiments also show that the relative humidity in impregnated walls is lower than in non-impregnated walls. This applies both in interfaces and in embedded wooden elements.
6. There is a positive effect of deliberately installing a superficial thermal bridge consisting of a material with a lower insulation capacity in front of embedded wooden elements such as wall plates and beam ends. This means that the moisture content of the wood elements is significantly reduced (see Figure 3.3)
7. Experiments with different insulation thicknesses indicate that thinner insulation leads to a lower risk of high moisture and mould growth.
8. Experiments with 60% relative humidity in the indoor climate showed that heavy furniture with dense upholstery should not be placed directly against the interior surface of exterior walls, as this can lead to increased relative humidity between the wall and the furniture. Picture frames that were hung 1.5 cm from the inside surface of the wall did not lead to increased relative humidity between the wall and the picture frame.
9. It is possible to paint with diffusion-tight paint instead of diffusion-open, without this leading to increased moisture in the wall. The effect of each coat of diffusion-tight paint is relatively small, and it will require many over-paintings before it has a noticeable negative effect on moisture.

It should be noted that the above results are based on a limited number of experiments that do not take into account individual local conditions. So one should always make a specific assessment in the individual case before using them without reservation in practice. In addition, there are still some uncertainties regarding the different types of impregnation life and effect on different types of stone. Two PhD-projects have been associated with this project [19] and [20].

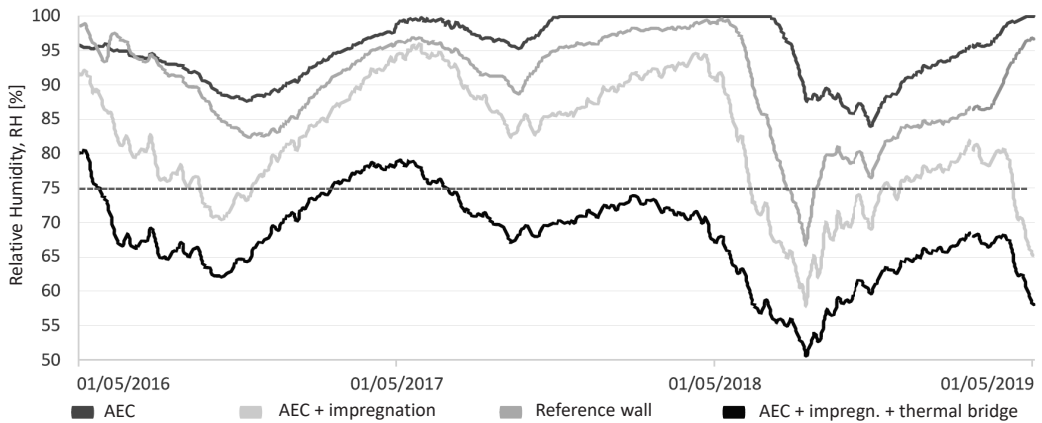


Figure 3.3: Relative humidity in embedded wooden wall plate for interior insulation with 100 mm lightweight concrete, measured for three years. Unlike the beam, the wall plate is critical as it is completely embedded in the wall and therefore has difficulty releasing moisture.

3.3 Prevention of mould growth with solid interior insulation boards

With the somewhat high moisture contents found in the previous set of experiments, necessary precautions should be taken to prevent mould growth. This means that the walls should be thoroughly cleaned for all organic material, not least any mould residues. It is important that the substrate constituted by the masonry wall surface is flush even so that no voids appear in the adhesive when the insulation boards are installed.

3.3.1 Background

Internal insulation is technically difficult as it reduces the temperature of the original wall, leading to the risk of condensation and mould growth in the structure. Wind-driven rain, rising damp and summer condensation are already known to be raising the moisture content of the outer wall. Thus, internal insulation further contributes to increasing the moisture load and results in a deteriorated indoor climate, in addition to reducing the intended effect of the thermal insulation.

Traditionally, internal insulation is performed as an internal wall built-up consisting of a wooden or steel skeleton, mineral wool, a vapour barrier and plasterboard (Figure 3.4). It can be difficult to achieve a completely tight vapour barrier, and even small leaks mean that hot and humid air can penetrate into the construction, where the water vapour condenses and the moisture has difficulty escaping again due to the vapour barrier.

In recent years, several alternatives to the traditional built-up of interior wall insulation have been marketed, e.g. systems with diffusion-open, capillary-active insulation materials (Figure 3.5), and diffusion-tight systems (Figure 3.6). Common to these systems is that they are glued directly to the inside of the outer wall with alkaline adhesive mortar, which may inhibit mould growth.

3.3.2 Test of insulation systems

In a comparative study, four different insulation materials (see Figure 3.7) were mounted on test walls of solid masonry using the associated adhesives (Andersen et al., 2020). The test walls were

placed in airtight chambers with control of the relative humidity. Over a period of 12 months, measurements were made of the moisture content of the materials and the pH value of the adhesives, and the walls well as examined for mould spores and mould growth. The effect of different methods of cleaning the walls before installing the insulation was also tested. The results point to a number of factors that are important in preventing mould growth in this type of internal insulation.

3.3.3 Pretreatment of walls

The best starting point for internal insulation with solid insulation material is a dry, even and clean wall. The study showed that mould spores can survive in a strongly alkaline environment, but without growing. It is therefore important to remove any mould and other organic material, such as remnants of wallpaper, glue and paint. Complete mechanical cleaning with subsequent sanding or full filling is most effective. Hand-held cleaning, where the wallpaper is removed with a spatula, leaves glue residue with mould spores. Spatula cleaning and subsequent steam cleaning also leave mould spores if some areas are overlooked or undertreated (Andersen et al., 2020). Plastering or full plastering of the walls has the advantage that uneven surfaces are corrected, so that cavities are prevented where mould spores can grow if the pH value should fall.

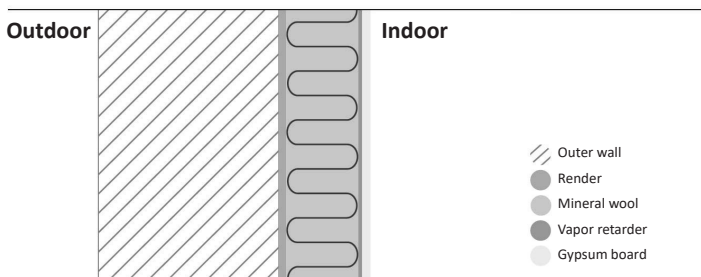


Figure 3.4. Traditional internal insulation with an interior built-up consisting of a wooden or steel skeleton (not shown here), mineral wool, vapour barrier and plasterboard. Condensation may form.

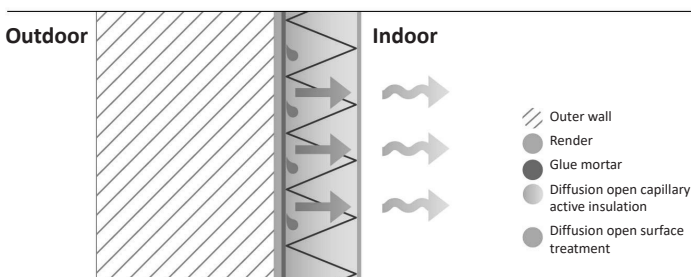


Figure 3.5. Example of diffusion-open and capillary-sucking internal insulation system. Condensation can be absorbed by the insulation material and transported to its inner surface, where it can evaporate.

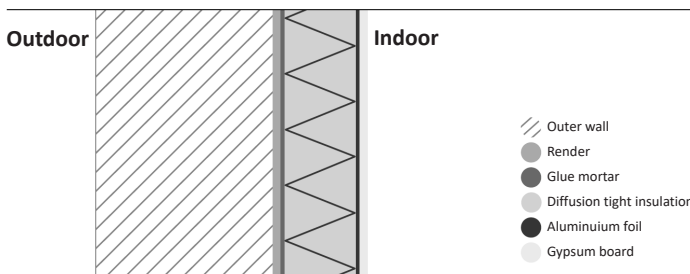


Figure 3.6. Example of a diffusion-tight insulation system consisting of a solid board with a built-in aluminium foil and gypsum board. Moisture can accumulate in the diffusion-tight insulation systems, but has difficulty getting out again.

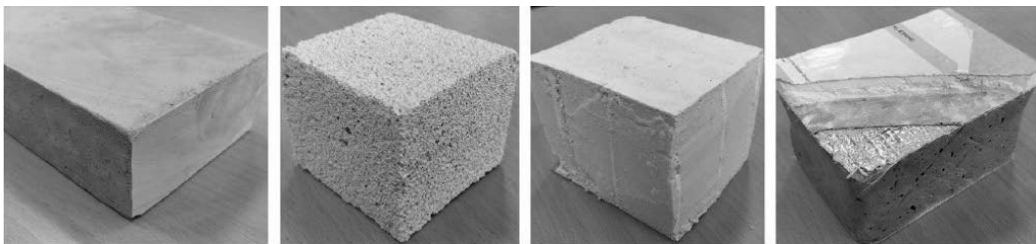


Figure 3.7. The four materials for internal insulation that were included in the test. From left: Calcium silicate, light aerated concrete, polyurethane foam with capillary suction channels and phenolic foam with aluminum foil and plasterboard.

3.3.4 High pH inhibits mould growth

The study has shown that a high pH value in the adhesive mortar between the insulation and the outer wall can inhibit mould growth despite high moisture levels. The adhesives of system solutions are often cement-based with a pH value above 11. An important measure to prevent mould growth is that the high pH value is maintained. However, it is expected that the pH will be reduced over time, thereby reducing the protective effect accordingly. A study has shown that if the pH value drops to 9.5 and below, and the moisture level in the wall is high, mould growth can occur [20].

3.3.5 Advantages and disadvantages of insulation systems

There are pros and cons to all interior insulation systems. The choice of insulation system depends, for example, on previous infestation with mould growth or high moisture levels. A study has shown that if the wind-driven rain load of a solid brick wall is limited by external impregnation of the facade, the moisture level in the interface between wall and insulation is reduced [20]. In this case, lower moisture levels were observed in the diffusion-tight solutions than in walls with diffusion-open solutions. However, the long-term effect and durability of impregnation of brick walls is not yet known. Solid brick walls, which are exposed to heavy rainfall without being impregnated, generally have high humidity in the interface between wall and insulation, and here the results show that the diffusion-open systems have slightly lower moisture levels than the dense systems [20].

3.3.6 When not to insulate from the inside?

It is generally not recommended to use internal insulation if there is rising damp, moisture penetration from the ground, defective outer wall surface, or penetrating rain. The facade must be in good condition, i.e. there must be no increased moisture content, frost cracks, degraded mortar joints, or peeling paint/plaster. These problems must be solved before the internal insulation is set up [1].

4. Moisture modelling with hysteresis in sorption isotherms

With narrated excerpts from [21] and [22].

4.1 Introduction

The sorption isotherms that describe the equilibrium moisture content in a material as a function of the relative humidity in its environment are crucial to describe the property for moisture retention in hygroscopic building materials, and the curves are crucial for moisture simulation. However, the sorption isotherms do not define the states of equilibrium in an unequivocal way. Differences occur between the curves for ab- and desorption. Scanning curves are followed when the "moisture history" changes from for instance wetting to drying.

The existence of hysteresis in the sorption isotherms of building materials has been known for a long time and has often been experimentally verified. Many explanations have been derived to explain why hysteresis occurs. Such explanations and accompanying measurements are presented by for instance Ahlgren [24].

Despite of these research efforts on the material level, not much is known about the impact of hysteresis for composite constructions exposed to a naturally varying climate. The computer program MATCH for combined heat and moisture transfer in building constructions has an option to include an empirical description of hysteresis in the sorption isotherms of the building materials.

4.2 The computer program MATCH

MATCH is short for Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials, and was developed during the author's PhD project [23]. The main features of the model are the following:

- A finite control volume method (FCV) is used.
- Both moisture and temperature distributions are calculated transiently.
- The calculations are 1-dimensional.
- Transport of moisture both as vapour and liquid.
- Material properties vary with temperature and moisture content.
- Phase conversion enthalpies accounted for.
- Hysteresis in the moisture retention properties accounted for.

By the time, MATCH was probably the first transient heat and moisture transfer model made available to designers of buildings and building components to incorporate more sophisticated calculation principles in hygrothermal design of constructions.

An empirical expression was derived to express the moisture capacity, ξ , when a scanning curve is followed, i.e. when the moisture content is between the values corresponding to adsorption and desorption [23].

$$\xi_{hys} = \begin{cases} \frac{(u - u_a)^2 \cdot \xi_d + 0.1 \cdot (u - u_d)^2 \cdot \xi_a}{(u_d - u_a)^2} & \text{when humidity is decreasing} \\ \frac{0.1 \cdot (u - u_d)^2 \cdot \xi_d + (u - u_a)^2 \cdot \xi_a}{(u_d - u_a)^2} & \text{when humidity is increasing} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$u_{new} = u + \xi_{hys} \cdot d\varphi$$

where:

u = Current moisture content, MC (-)

u_a = MC for the current RH, according to the adsorption curve (-)

u_d = MC for the current RH, according to the desorption curve (-)

ξ_a = moisture capacity for the current RH, according to the adsorption curve (-)

ξ_d = moisture capacity for the current RH, according to the desorption curve (-)

u = MC at the actual time step (-)

ξ = moisture capacity at the actual time step (-)

u_{new} = MC at the next time step (-)

$d\varphi$ = variation of RH

The empirical model is defined using only the adsorption and desorption curve and is not based on physical phenomena, but it could be adapted to different hysteretic behaviours. The coefficients 0.1 of the equation could be substituted with other fitting values that may possibly result in better representations of the hygrothermal states of the material.

4.3 Specimen with emphasized hysteresis

A calculation was performed to simulate scanning curves for a specimen of aerated concrete under conditions where these curves would be highly visible in the sorption diagram. The results apply to curves in both the suction and the sorption diagram, though for simplicity, only the latter is shown.

The simulated specimen, which was 3.5 cm thick, was equally divided into 7 control volumes and exposed at the bottom surface to a constant climate at 25°C. The top surface was exposed to a climate that gave surface temperatures varying sinusoidally between 0°C and 30°C. The sine function had a period of 6 days. Both surfaces were sealed to be vapour tight and the starting moisture content in all layers of the material corresponded to 56 % relative humidity (RH) at desorption.

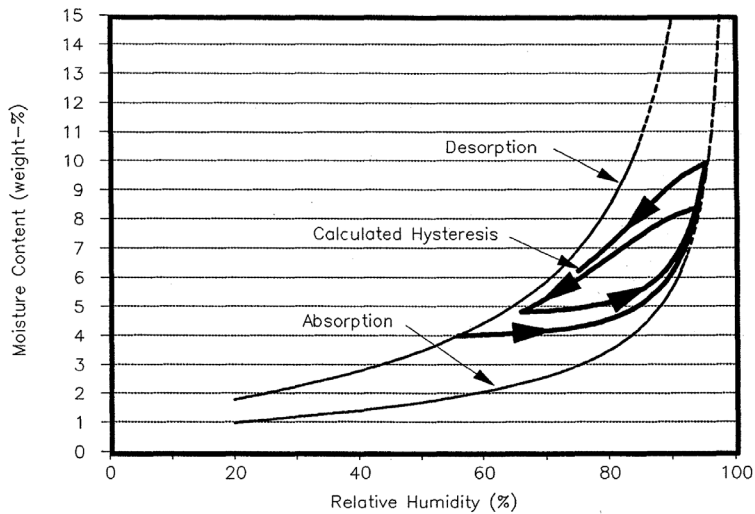


Figure 4.1 Scanning curves followed in the sorption diagram during extended periods of steady drying alternating with periods of steady wetting.

Figure 4.1 shows the trajectory in the sorption diagram followed by the (RH, u) -data of the top layer as time went by. Top temperatures started falling from 15°C and some moisture was therefore migrating towards the top. The absorption curve was approached during this process with the first scanning curve. The (RH, u) -data came quite close to the absorption curve within the first 3 days (the first piece of curve). Then followed a period with higher top surface temperatures and the (RH, u) -data now followed another scanning curve, rapidly moving away from the absorption curve and approaching the desorption curve more and more closely as time went by. Finally, two more reversals are shown.

The example is somewhat hypothetical since most constructions are exposed to a climate that varies in diurnal cycles (except in the laboratory). However, it serves to show that the followed scanning curves have a plausible shape.

4.4 Naturally exposed construction

From [22] we show the example of the moisture content in an exterior wall with solid timber, and we copy the conditions exemplified in that paper, see Figure 4.2. The wall is located in Copenhagen, and faces north. A 10 year simulation was carried out.

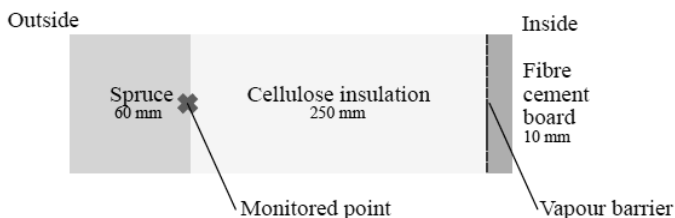


Figure 4.2 Description of layers of the building envelope used in the simulations and location of the monitored point considered for the wood decay risk analysis.

The material properties for spruce and the fibre cement board are taken from [25] and the sorption curves considered are obtained from the approximation functions, while the cellulose

insulation is taken from the MATCH material database with data from [26]. The boundary conditions of the external environment are calculated by cycling the DRY weather file provided in the MATCH weather file database. The interior environment is set to monthly constant values of temperature and RH, typically found in Copenhagen, reported in [1].

MATCH was used to provide results of temperatures, relative humidity (RH) and moisture content (MC) at the monitored point. These values are here shortly compared to evaluate the effect of hysteresis.

When considering RH values, the largest differences are lower than 0.5% RH, while the annual mean difference is lower than 0.1% RH. The daily average RH values are presented in Figure 4.3. In this case, the RH values obtained considering hysteresis are higher than the other results during the wet months (from December to April) and lower during the dry months (from June to September). This effect is due to the different relation between RH and MC, later shown in Figure 4.5. Also, desorption curve simulations result in RH values lower than the ones of the adsorption curve, and mean sorption curve RH values in between the two as reported in [27].

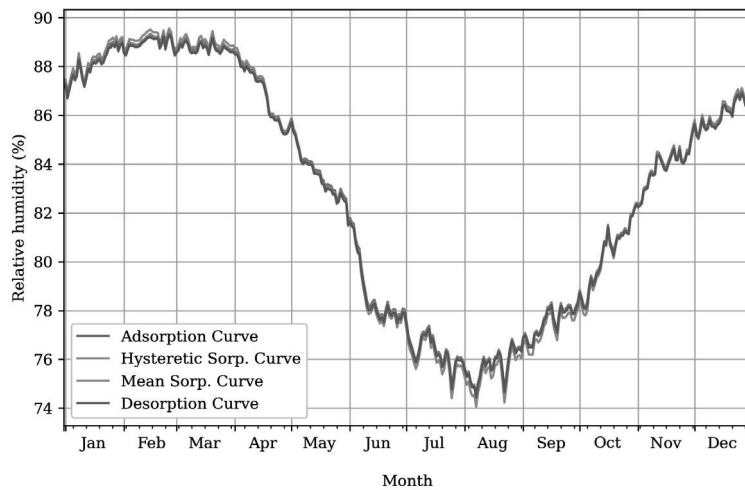


Figure 4.3. Daily averaged relative humidity values at the monitored point for the four sorption functions at the 10th year of simulation.

MC values are presented in Figure 4.4. The curves have the expected relative position: the desorption curve MC values have a mean value of 21.3% MC, while the adsorption curve 16.9% MC. The maximum difference from the results with hysteresis is lower than 3% MC. The mean sorption curve and the hysteresis results are between the desorption and the adsorption MC values, with 19.09% MC and 18.94% MC mean values respectively.

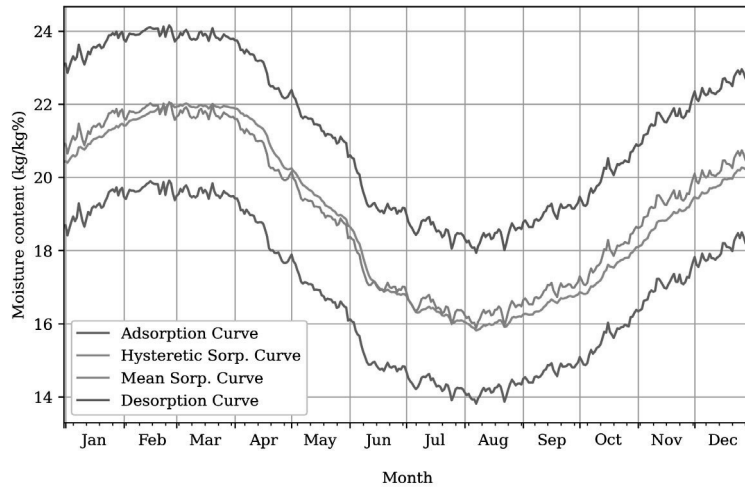


Figure 4.4. Daily averaged moisture content values at the monitored point for the four sorption functions at the 10th year of simulation.

The evolution of the hygric states calculated in the simulations are presented on the RH-MC plane in Figure 4.5. The states calculated with bijective sorption curves correspond to the sorption curves, while the results of the simulation with hysteresis are bounded between the adsorption curve and the desorption curve. The path of the hysteretic states is the result of the yearly cycling of the internal and external boundary conditions. The reduced slope of the hysteresis curve, due to the hysteresis model (Eq. 4.1), explains the small differences in the RH and temperature values (Figure 4.3).

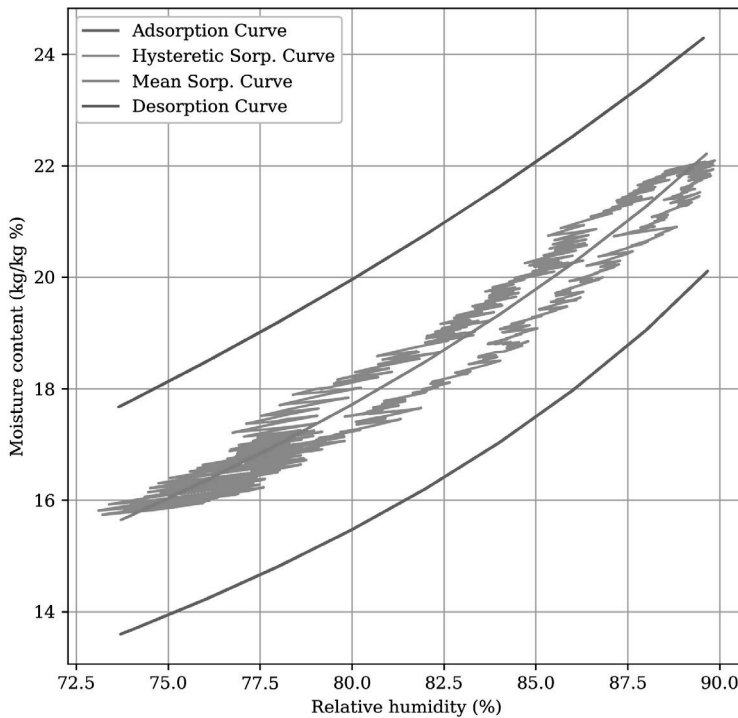


Figure 4.5. Hourly values of the hygric state (moisture content over relative humidity) at the monitored point for the four sorption functions at the 10th year of simulation.

Finally, the results of the wood decay risk assessment are presented in Figure 4.6. The cumulative function of hours of the year above 20% MC for each studied case show that the mean sorption curve is an acceptable approximation. At the end of the year, the hysteresis simulation obtained 3215 hours, while the mean sorption curve 3504 hours. The desorption curve is an upper boundary for the MC values with 5654 hours above 20% MC, while the adsorption curve is a lower boundary, with only 29 hours above 20% MC. Depending on the application, a risk assessment performed using the adsorption curve could lead to an acceptable risk level, while the desorption curve would lead to an unacceptable risk. Using the mean sorption curve could lead to small modifications of the envelope design. For a conservative design procedure, the desorption curve results should be considered.

It is interesting to note that the desorption curve and the adsorption curve obtained different results, while both the mean curve and the hysteretic sorption model (not simplified) obtained rather similar and intermediate result.

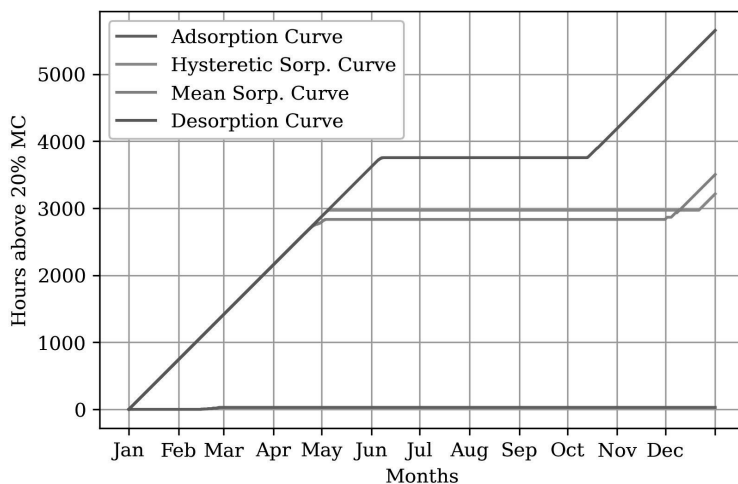


Figure 4.6. Cumulative number of hours over 20% MC at the monitored point for the four sorption functions at the 10th year of simulation.

4.5 Conclusions on moisture modelling with hysteresis

The results of four risk assessments performed on a timber wall with four different sorption functions are presented. The simulations are performed with the software MATCH that allows to consider hysteresis in the simulations using the empirical model. The damage rate is evaluated with a simplified model, as the number of hours of the year with moisture content values over 20%. The results show that for the studied case, the relative humidity values obtained with the bijective sorption curves have small differences from the hysteresis results and thus they would cause small differences in damage models. The most relevant differences are found in the moisture content values, with annual average differences lower than 2.32% MC. When the risk assessment is performed, on one hand, the desorption curve obtains a higher decay rate, that could be considered conservative. The results of the adsorption curve, on the other hand, show very low risk, thus not a cautious estimation. The mean sorption curve, instead, gives an estimation of the risk similar to the one obtained with hysteresis. However, as shown in Figures 4.4 and 4.5, although the annual averages of the moisture content are similar between the calculations using the hysteretic and the average sorption curve, the periodic tendencies are different, i.e. during fall, the moisture contents are lowest with the hysteretic model, and highest during spring compared to the results when using the average sorption curve. Since late winter, early spring is typically the most critical period for wood moisture decay, the hysteretic model may give a more realistic representation of this critical situation, and the criterion we have applied in this paper to only discriminate between the number of hours above/below 20% MC may be too simple. A more advanced wood decay model has been adopted in [22]. For similar boundary conditions, and using the same hysteresis model, these results are expected also for other material typologies with damage criteria based on moisture content.

5. Acknowledgements

Collaboration with and contributions from co-authors of publications [12], [15], [17], [18], and [22] are highly appreciated.

6. References

- [1] Brandt, E. et al. 2009. SBI-instruction 224: Moisture in buildings. In Danish. Danish Building Research Institute, Aalborg University.
- [2] Bryson, H.C. 1937. Non-compliant products concrete cancer. Sands, Clays and Minerals — Vol. 3, Issue 2, pp. 137-140.
- [3] Herholdt, A. et al. 2007. The Concrete Book. In Danish. Aalborg Portland; 1985.
- [4] Thomas, R. 2007. What is MgO Board? Wall & Ceiling Magazine, USA.
- [5] ICC EVALUATION SERVICE, INC. 2007. Acceptance criteria for fiber-reinforced magnesium-oxide-based sheets. AC308.
- [6] ICC EVALUATION SERVICE, INC., 2015. Magnum board. ICC-ES Evaluation Report, ESR-2880.
- [7] MBP MAGNUM BUILDING PRODUCTS. 2015. Helping The World Building Green. General. MBP Edition -IP, LLC.
- [8] Exova. 2010. Evaluation of insulated panels with MgO boards facings for water vapor permeance in accordance with ASTM E 96.
- [9] JamesHardie. 2010. Information on Magnesium Oxide (MgO) and Magnesium Chloride (MgCl) building products. Technical A #23.
- [10] Maya Magstone Inc. 2008. Magnesium oxychloride cement. Patent WO2008063904A2.
- [11] EN 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties.
- [12] Nielsen SW, Bunch-Nielsen T, Hansen KK, Kunther W, Grell B, Rode C. 2019. Characteristics of Chloride and Sulfate Based Magnesium Oxide Boards. Paper presented at 2019 Buildings XIV International Conference, Clearwater Beach, United States.
- [13] Dincel & Associates, Non-compliant products concrete cancer of concrete walls having permanent formwork with fibre cement (FC) sheets and magnesium oxide (MgO) boards
- [14] BYG-ERFA. 2015. Fugtsugende vindspærreplader. Experience sheet (21) 150505.
- [15] Rode, C.; Bunch-Nielsen, T.; Hansen, K.K.; Grell, B. 2017. Moisture damage with magnesium oxide boards in Danish facade structures. In: Energy Procedia, Vol. 132, p. 765-770. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.025.
- [16] RIBuild. Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings. Horizon 2020 project. www.ribuild.eu.
- [17] Bjarløv, S.P. and Jensen, N.F. 2019. Indvendig isolering af murede facadevægge. (Interior insulation of masonry facade walls, in Danish) BYG analyse 2. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- [18] Rode, C., Andersen, B., Jensen, N.F. and Møller, E.B. 2021. Forebyggelse af skimmel ved indvendig efterisolering med faste plader. (Prevention of mould by interior insulation with insulation boards, in Danish). BYG analyse 4. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- [19] Odgaard, T.R. 2019. Challenges when retrofitting multi-storey buildings with interior thermal insulation. PhD Thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. 312 p.
- [20] Jensen N.F. 2021. Robust solutions for internal retrofitting solid masonry walls in historic buildings with regards to hygrothermal performance. PhD Thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. 265 p.
- [21] Pedersen, C.R. 1990. Transient calculation of moisture migration using a simplified description of hysteresis in the sorption isotherms. Proceedings of 2nd Symposium on Building Physics the Nordic Countries. Trondheim, Norway.

- [22] Libralato M, De Angelis A, D'Agaro P, Cortella G, Qin M, Rode C, 2021 Damage risk assessment of building materials with moisture hysteresis. International Building Physics Conference 2021, IBPC2021. Technical University of Denmark.
- [23] Pedersen, C.R. 1990. Combined heat and moisture transfer in building constructions. PhD Thesis. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark.
- [24] Ahlgren, L. 1972. "Fuktfixering i porosa byggnadsmaterial", Division of Building Technology, The Lund Institute of Technology, Report 36.
- [25] Hansen K. H. 1986 Sorption isotherms: a catalogue Byg Rapport, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark
- [26] Burch, D.M. and Thomas, W.C. 1993. MOIST - A PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes, NIST Special Publication 853, National Institute of Standards and Technology.
- [27] Libralato M., De Angelis A. Saro O., Qin M. and Rode C. 2021. Effects of considering moisture hysteresis on wood decay risk simulations of building envelopes. Journal of Building Engineering, Vol 42, pp. 102444.

Renovation of facades in Estonia - challenges and solutions in terms of building physics

Targo Kalamees

nZEB Research Group, Tallinn University of Technology, Estonia

Abstract

An extensive need for the deep energy renovation of existing building stock has been the focus of consideration for many decades. Important issues are the resilience of renovation solutions to avoid unnecessary costs and increasing the efficiency of renovations to meet the challenges of the renovation wave. External thermal insulation composite system, which is currently the most common solution for additional insulation of facades in Estonia, will become out of date due to its high share of craftsmanship and low durability. There is a need to find more industrial, efficient and time-resistant solutions for building renovation. New solutions can bring about unexpected changes in the perceptions that have been established so far. It is therefore necessary to carry out a thorough modelling and measurement of the new renovation solutions before their widespread use. This presentation gives some examples of Estonian renovation practice that are good to know so that you don't repeat these mistakes yourself or just take an example (decide for yourself). The challenges ahead are also described.

1. Introduction

The European Union has set a target to develop a sustainable, competitive, secure, and decarbonised energy system by 2050, and the built environment has a major role to play in accomplishing this goal. In Estonia, more than 70% of the residents live in apartment buildings, constructed before 1990. 82% of dwellings are privately owned and at present about 75% of buildings are highly inefficient, consuming about 50% of total energy produced in Estonia. The majority of today's building stock is projected to still be in use in 2050, but presently only about 1% of it is renovated each year.

The Renovation Wave Strategy aims to double the rate of building renovation in the EU from 1% to at least 2% annually by the end of this decade. Estonia's long-term building renovation strategy [1] projects that the renovation rate in a year must increase up to 5 times on average, with certain sectors needing even steeper improvements e.g. the rate of deep renovation of single-family residences needs to increase 11-fold over the next 30 years (from 70 000 m²/year during 2020 – 2025 to 800 000m²/year during 2040 – 2050) and the renovation rate of private non-residential buildings needs to increase 6-fold over the next 20 years (from 140 000 m²/year during 2020 – 2025 to 800 000m²/year during 2035 – 2045), see Figure 1. According to forecasts, up to around 5000 apartment buildings and up to 10000 non-residential buildings will fall into disuse by 2050.

It has been confirmed that investment in renovation of buildings is not only environmentally important, but provides economic benefits on an individual and government budget level. For example, in Estonia 1 M€ of annual investment in renovation generated 17 jobs per year and direct tax revenue was between 32-33%, depending on the renovation project.

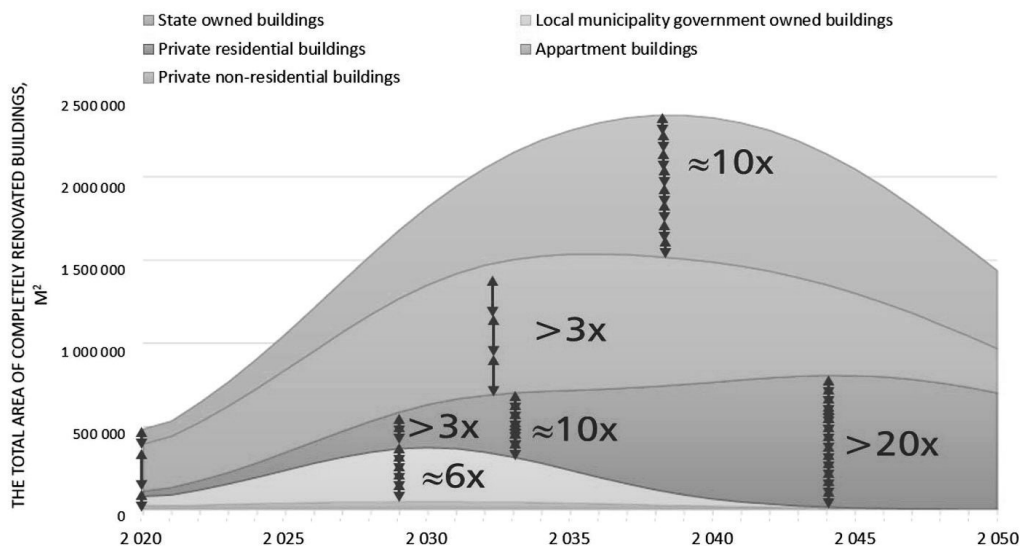


Figure 1. The renovation wave expected to reach in Estonia during coming decades and increase on renovation volume comparing with today's situation.

An integrated approach to building renovation is needed by increasing the energy performance of buildings, designing and constructing durable and moisture-safe building envelopes, deploying renewables, preparing for climate impacts, deploying urban green and blue infrastructure, and incorporating circular economy, waste treatment and pollution prevention principles. Renovation wave signifies an urgent need for raising capacities, providing technical, social, and financial solutions, and establishing technical competences, to guarantee that the renovation initiative will pursue its main goals – improvement of climate mitigation and energy performance. Skills and knowledge in the field of building physics are related to the achievement of many goals, either directly or by avoiding unintended consequences.

This presentation gives some examples of Estonian renovation practice that are good to know so that you don't repeat these mistakes yourself or just take an example (decide for yourself).

2. External thermal insulation composite systems

Exterior thermal insulation composite systems have been widely used in Estonia to renovate the facades of apartment buildings. One of the main reason for this is the low construction cost comparing the ventilated façade (average prices 60 €/m² and 100 €/m², respectively [2], see Figure 2) especially for low budget renovation [3].

Nevertheless, the construction price is only one part of the whole life cycle cost. Repair and reconstruction cost are relatively high for ETICS facades, because their short service life. The majority of visible defects in the years following the completion are caused by shortcomings during the construction process [4]. Shortcomings during construction often cause defects on the facade or reduced thermal efficiency of the building because of gaps between insulation plates [5]. Sulakatko studied the durability of ETICS in Estonia and showed that 90 % of the degradation factors appear during the five-year period after construction, while 50 % of them are visible as early as the first two years [6].

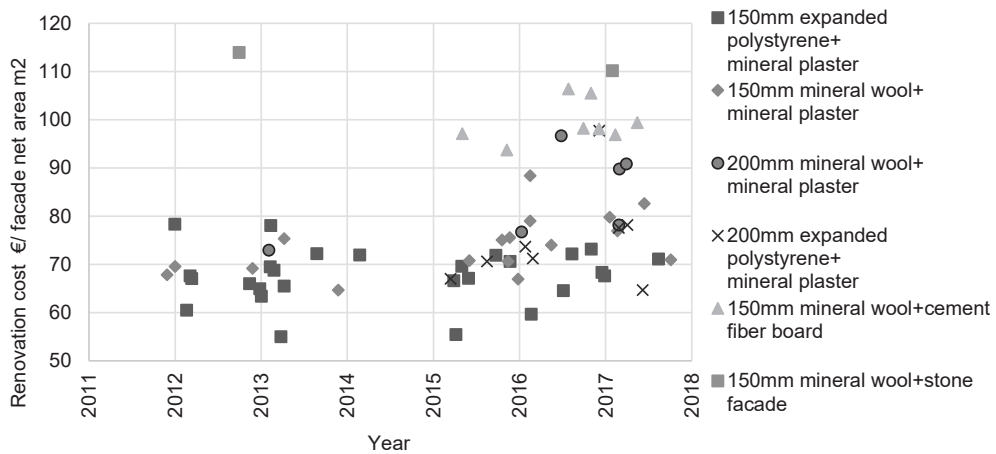


Figure 2. Cost of the facade renovation depending it's technology.

Installation the ETICS is wet construction process and after the installation concrete façade become wet and expanded polystyrene slow down drying process. Installation of ETICS increases the reinforcement corrosion propagation during a short period of time while the moisture dries out [7]. According to the measurements, moisture in the ETICS insulated external wall (existing moisture in the external core and additional moisture from adhesive mortar) dried out during within 3–4 months, mainly by diffusion and with minor convection [8]. Therefore the ETICS with all the studied thermal insulation materials do not increase the reinforcement corrosion in long term. Corrosion of reinforcement in carbonated concrete after applying ETICS rises for less than a year but becomes low later on, and therefore, no cracking will occur. Therefore, ETICS as a renovation scenario is acceptable in terms of corrosion propagation [7].

When insulating facades, moving of all the windows towards outside is advisable because of esthetics and architecture, reduced day lighting, energy efficiency, and mainly thermal bridges around the windows. Thermal bridge at the junction of the external wall and windows/doors is one of the most critical of Estonian old apartment buildings $-f_{Rsi}$ 0.66–0.70 [9]. Window's jamb insulation is in practice complicated and often only 5–20mm is achievable. When windows are left to original position and concrete balcony slab's thermal bridge also stays, the theoretical thickness of additional wall insulation need-ed to compensate linear thermal transmittance of thermal bridges ends up at infinity [10]. On the other words the heat loss through the thermal bridges is larger than heat loss through the whole wall area.

3. Prefabricated renovation

Renovation needs and the performance of the external envelope have been recently well studied [11]. Research of current technical conditions of the Estonian old apartment buildings refers to in general (the most critical areas are balcony, pent, and façade), satisfactory conditions in terms of load-bearing, but highlights insufficient energy performance, poor indoor climate and hygrothermal performance of the building envelope, and also shows that it is reasonable to reduce the thermal transmittance of large panel apartment buildings' envelope down to $U = 0.11 - 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and for that, ~200 – 300 mm thick insulation has to be installed on the external envelope [12]. In Estonia it took about two years to reach 30 renovation grant applications per month [13]. Nevertheless, just demanding more renovation and offering financial

support are not enough for effective results. The tripled volume of renovation created problems such as shortage of contractors, construction workers and construction materials and a 20% increase of construction costs in a relatively short period of time. These developments confirm the urgent need for more effective technologies and a new approach.

Prefabrication of buildings has been one of the methods to improve the quality and to increase the effectiveness of construction for many decades. Designers, developers and owners are in search of innovative ways to minimize operating costs and the environmental impact of buildings, while also increasing their functionality. Increasing energy performance has been the driving force for renovation of old prefabricated concrete large panel apartment buildings because energy related measures help to increase cost-effectiveness of the whole renovation process and the upkeep of buildings. An innovative way of renovation is the application of prefabricated multifunctional renovation elements which has the potential to reduce costs and renovation time, reduce disturbance for occupants and, at the same time, enhance quality and performance in terms of energy efficiency, building physics and indoor climate.

Cost-effectiveness and advanced energy-efficient retrofit strategies that create added value for the existing building stock have been investigated in several projects, which have proved the viability of the new retrofitting solutions. Many of these projects focus on technological development and improvement of energy performance of building. Most of the described projects have not analysed (or reported the results of) the hygrothermal performance associated with the original building envelope and its condition.

During recent years already two prefabricated renovation pilots have been conducted, Figure 3. In these studies we examined potential hygrothermal risks and their effect on prefabricated timber frame insulation elements used in the deep energy renovation of apartment buildings in cold and humid climate conditions [14].



Figure 3. Renovation of 5-storey apartment building by using prefabricated insulation elements: MoreConnect pilot (left, [15]) and DRIVE0 pilot (right, [16]).

The total thickness of designed modular wall elements is 300 – 400mm, depending on the surface flatness of the existing wall. The total thickness of the MoreConnect insulation elements 305-345mm: 30mm wind barrier, 70+195mm insulation between timber frames and 10-50mm light elastic mineral wool to fill the unevenness and roughness of the existing surfaces, $U_{\text{wall}}=0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. In the wall panel with dimensions $3\times 9 \text{ m}$, installed in horizontal direction, are up to three preinstalled windows, Figure 5.

The hygrothermal performance of a timber frame in cold climates has generally been well studied [17]. One of the most critical design tasks was the selection of a vapor barrier for the wall

module. The most influential parameters here are a built-in moisture dry-out after the installation of the insulation modules

To determine possible critical moisture content and the influence of rain on an external wall without additional external insulation (before renovation), simulations using a calibrated model of Delphin were conducted for reinforced large panel wall [18] and aerated autoclaved concrete (AAC) [16] before installation the prefabricated insulation elements. The initial moisture content of the exterior slab of the concrete facade was $w = 110 \text{ kg/m}^3$, representing the most critical season of the year and wall orientation to south-west as the most critical to wind driven rain. The critical initial moisture content (design value) for the surface section of the AAC panel is 65 kg/m^3 at a depth of 15 mm and 39 kg/m^3 at a depth of 70 mm.

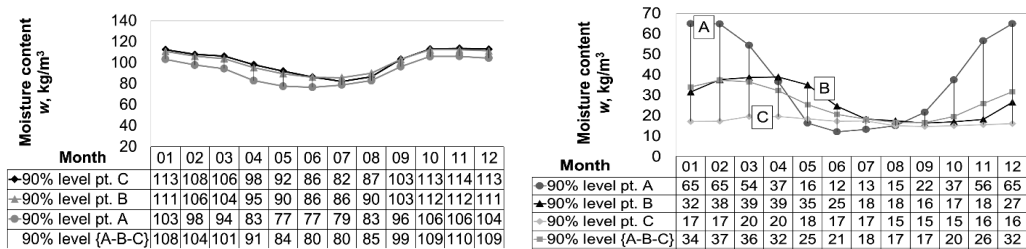


Figure 4. Monthly moisture content in the concrete (left) and AAC facade (right) at different depths (A=0-20mm, B=20-40mm, C=40-60mm), during the period (1970-2012) without external additional insulation.

Initial moisture content (IMC) of old wall to be insulated plays important role for the hygrothermal performance and material selection of prefabricated insulation element, Figure 5.

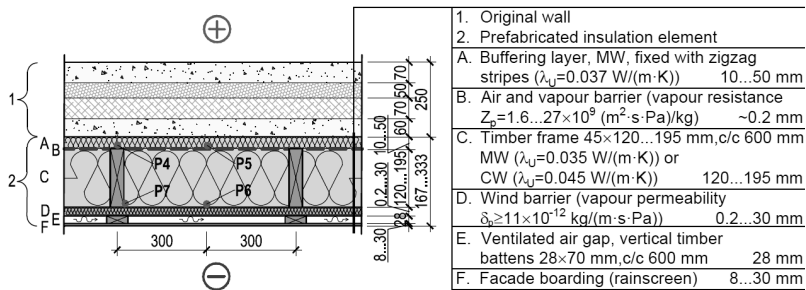


Figure 5. Horizontal cross-section of the original concrete wall with installed prefabricated timber frame insulation element and analysed critical points.

Although in a timber frame wall, polyethylene (PE) foil vapor barrier is usually not a big problem in cold climates, in case of prefabricated additional insulation element, it prevents drying out of constructional moisture and causes a long period of high humidity between the old wall and the additional insulation, Figure 6.

When using a vapour barrier with varying vapour resistance ($0.2 \text{ m} \leq S_d \leq 5 \text{ m}$) as the air and vapour control layer (see VVR in figures), the RH in the monitored points dropped after initiation relatively quickly and reached an equilibrium state in the course of 4–6 months, Figure 7. The highest level of RH throughout the calculated period was observed in point 4, between the original concrete facade and the air and vapour barrier. The overall trend of RH in point 6 (behind the wind barrier) was slightly higher than in the first stage of simulations with PE-foil.

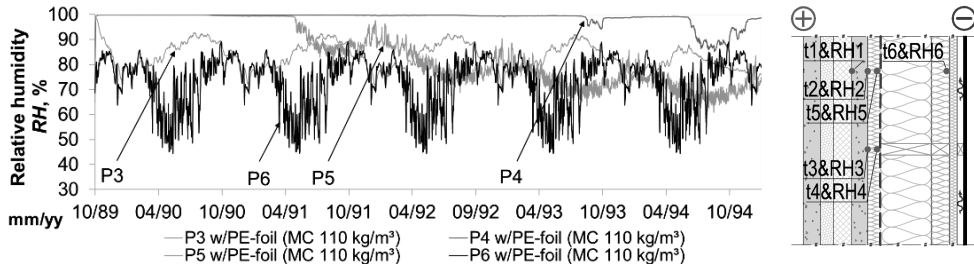


Figure 6. Relative humidity in the analysed points 3, 4, 5 and 6 with PE-foil as the air and vapour barrier layer in a 5-year period when the IMC of the concrete facade $w = 110 \text{ kg/m}^3$. More details see from [19].

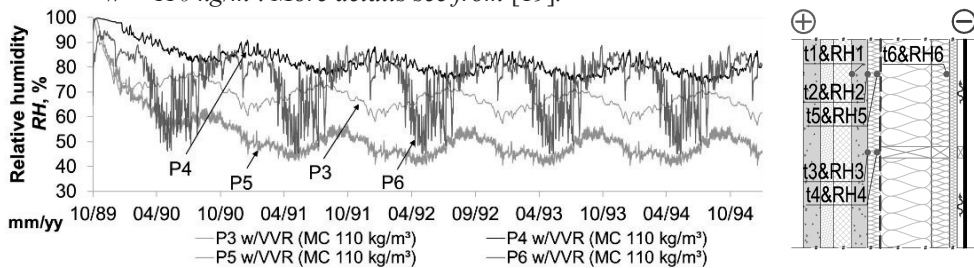


Figure 7. Relative humidity in the analysed points 3, 4, 5 and 6 with a vapour barrier with varying vapour resistance ($0.2 \text{ m} \leq S_d \leq 5 \text{ m}$) in a 5-year period when the IMC of the concrete facade $w = 110 \text{ kg/m}^3$. More details see from [19].

Mould index M [20] was calculated in critical points (see Figure 5) for all sets studied at different IMC of concrete facade. Meeting the requirements of the hygrothermal performance was ascertained in point 4 (t4&RH4) with vapour barrier with varying vapour resistance ($0.2 \text{ m} \leq S_d \leq 5 \text{ m}$) when the IMC of the exterior slab of the original PCLP wall $w \leq 110 \text{ kg/m}^3$ or with 22 mm OSB when the IMC of the exterior slab of the original PCLP wall $w \leq 75 \text{ kg/m}^3$ or with PE foil when the IMC of the exterior slab of the original PCLP wall $w \leq 55 \text{ kg/m}^3$ [14].

Results of acceptable material combinations for concrete façade are shown in Table 1 for the following wind barrier materials: D1 – Sheathing membrane $\sim 0.2 \text{ mm}$ ($S_d = 0.015 \text{ m}$ at RH 85%); D2 – Gypsum board wind barrier 9 mm + sheathing membrane D1; D3 – Fibre cement board 9 mm; D4 – Wood fibreboard 22 mm; D5 – MW wind barrier board 30 mm with special facing by following colours green - no mould growth risk, $M < 1$; minor mould growth risk, $1 \leq M < 2$; high mould growth risk, $M \geq 2$. More details see from [21].

The mould growth risk of an externally insulated AAC wall with different wind barriers and installation seasons (i.e. with different initial moisture content) is shown in Table 2. More details see from [16].

Table 1. Mould index (*M*) for wall constructions with MW at the IMC of the original PCLP wall $w = 85 \text{ kg/m}^3$ ($u = 3.7\%$), $w = 95 \text{ kg/m}^3$ ($u = 4.1\%$), $w = 110 \text{ kg/m}^3$ ($u = 4.7\%$).

Wind barrier	Air and vapour barrier	Mould index <i>M</i> (green, yellow, red) with different frame thicknesses at the most critical points (4 or 6) *								
		120 mm			145 mm			195 mm		
		IMC of the PCLP wall (kg/m^3)								
		85	95	110	85	95	110	85	95	110
D1	B1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D2		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D3	0.2 m ≤ S_d ≤ 5 m	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D4		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D5		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D1	B2	6	6	6	6	6	6	6	6	6
D2		6	6	6	6	6	6	6	6	6
D3		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D4		6	6	6	6	6	6	6	6	6
D5		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D1	B3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D2		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D3		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D4		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D5		4	4	4	4	4	4	4	4	4

* Numbers 4 and 6 indicate the most critical points: Point 4 – between original wall and air and vapour barrier layer; Point 6 – between wind barrier and insulation layer of prefabricated element.

Table 2. The risk of mould growth (mould index *M*) of an externally insulated AAC wall with different wind barriers and installation seasons (i.e. with different initial moisture content). In the coloured cells are shown sensitivity classes of analysed points.

Analysed point	S_d of vapour barrier (m)	Installation season of prefabricated insulation elements								
		Autumn-Winter			Spring			Summer		
		0	0.2 – 5	≥50	0	0.2 – 5	≥50	0	0.2 – 5	≥50
Wind barrier – mineral wool board w/special facing 30 mm										
P3	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P4	S	MR	MR	S	MR	MR	S	MR	MR	MR
P5	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P6	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Wind barrier – fibre cement board 9 mm										
P3	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P4	S	MR	MR	S	MR	MR	S	MR	MR	MR
P5	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P6	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Wind barrier – gypsum board without paper surface 9 mm										
P3	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P4	S	MR	MR	S	MR	MR	S	MR	MR	MR
P5	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P6	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Wind barrier – oriented strand board (OSB) 12 mm										
P3	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P4	S	MR	MR	S	MR	MR	S	MR	MR	MR
P5	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
P6	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
P7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

4. Future challenges

4.1 Renovation and a service

Today's examples of prefabricated renovation are the result of H2020 research projects [22], [23] in close cooperation of Tallinn University of Technology and wood house company Matek (<https://www.matek.ee/>) and Timbeco (<https://timbeco.ee/fi/>). Thanks to successful pilot projects, the Estonian Ministry of Economic Affairs and Communications and state credit body KredEx prepared a pilot project that would enable standard design apartment buildings to be renovated under the Kredex-sponsored arrangement using prefabricated elements in the future. The ministry and KredEx are preparing a support arrangement that would allow about 20 apartment buildings up to five stories high and built to specific Soviet designs to be refurbished. Such a pilot project will allow the companies to gain extensive experience and will also building owners to order new technologies.

The pilot project will also test a "turnkey renovation service" where the renovation company will have to carry out everything from design to completion. This requires greater readiness for development, a more integrated approach and closer cooperation between different companies. Combining design and construction into a single contract takes the whole process longer, and in the context of highly volatile construction prices, there may be difficulties in determining the construction cost over several years in future. For example, building materials prices have risen significantly over the past year due to supply chains disrupted by the COVID pandemic. The price of energy has also risen, which is an important input for all prices. To escape the COVID crisis, extra money is being thrown into the market, which in no way curbs inflation. Flexible solutions need to be found to manage independently changing boundary conditions.

4.2 Advancement of prefabricated renovation solutions by the digitalization of workflows

Renovation solutions for buildings need to be industrialized, easy to use in design, and optimized for manufacture, transportation, and installation to provide good product and delivery performance. To design technical renovation solutions, designers need an overview of the existing building and its geometric conditions. The manual inventory modelling of existing buildings is manual and, hence, time-consuming. There is need to utilize a "scan to BIM" framework, including the workflow and method, to map the existing buildings to measure rapidly and to map the building's existing geometric conditions. Typically, inventory models are prepared manually. Laser scan data is fed into BIM authoring tools, and used as reference data to produce BIM models. Although the scanning itself often takes little time, the existing facility's inventory modelling is time-consuming and a human-driven modelling process. Due to the human-laden process, it is also prone to human error. Therefore, there is need to develop semi-automated or automated scan-to-BIM techniques.

During the design, designed solutions need to be assessed in terms of energy and sustainability performance to decide between alternatives. Currently, a lot of time and resources are wasted in design because no information requirements regarding the workflow from architectural model to energy and sustainability models are established. This is caused by architects and energy and sustainability engineers using different software applications to model and simulate indoor climate, energy, and sustainability. Engineers do not use the architect's model because it is not sufficiently accurate and adequately prepared for energy simulation. Best practice guidelines and design protocols are needed together with the information delivery manual and level of information need to facilitate the energy and sustainable modelling and simulation of buildings.

4.3 Prefabricated renovation of high-rise building

High-rise apartment blocks are the predominant archetype in Central and Eastern Europe. >30% of the Estonian concrete apartment buildings are 9-storey or higher buildings. Today we have successful examples of industrial renovation of single-storey to five-storey apartment buildings. The off-site prefabricated renovation technologies should be extended also to high-rise apartment buildings, which have specific challenges related to logistics, lifting and fixing of elements. The solutions should be optimised, from design to installation, operation and maintenance, considering the low embodied energy/disassembly/reuse/recycle of used materials. Special attention should be paid to the challenge of lifting, installation and fixing of the elements as well to the ensuring moisture safety of the whole process. Using the current moisture safety methods for prefabricated renovation of buildings, a new moisture safety protocol for industrialized renovation should be developed and tested. A new research project oPEN Lab will start in the end of 2021. oPEN Lab Tartu designs and innovations for 9-storey prefabricated renovations (Figure 8) are highly replicable all across Estonia but also in other countries in the region, steering the large-scale refurbishment of the building stock.



Figure 8. oPEN Lab pilot area in Tartu – three 9-storey apartment building will be renovated by using prefabricated insulation elements (photo Andres Tarto, 2013. EAM Fk 19856).

Acknowledgements

The author gratefully acknowledge the financial support by H2020 projects no. 841850 ‘DRIVE 0 - Driving decarbonisation of the EU building stock by enhancing a consumer centred and locally based circular renovation process’, no. 101037080 oPEN Lab: Open innovation living labs for Positive Energy Neighbourhoods, no. 856602 ‘Finest Twins’; the Estonian Research Council with personal research funding grant PRG483 ‘Moisture safety of interior insulation, constructional moisture, and thermally efficient building envelope’; Estonian Centre of Excellence in Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts (grant no. TK146).

References

- [1] LTRS, “Long-term strategy for building renovation,” Tallinn, 2020. [Online]. Available: https://www.kul.ee/sites/kulminn/files/lisa_3_-_kvaliteetne_ruum_aluspohimotted.pdf.
- [2] G. Miller, L. Lihtmaa, and T. Kalamees, “Dynamics of Apartment Building Renovation Costs Based on KredEx Reconstruction Grant Scheme,” in *6th International Conference Central Europe towards Sustainable Building (CESB22)*, 2022, p. 8.
- [3] K. Kuusk, T. Kalamees, S. Link, S. Ilomets, and A. Mikola, “Case-study analysis of concrete large-panel apartment building at pre- and post low-budget energy-renovation,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 67–75, 2016, doi: 10.3846/13923730.2014.975741.
- [4] V. Sulakatko, “Modelling Construction Process Impact Factors on Degradation of Thin Rendered Facades,” Tallinn University of Technology, 2019.
- [5] V. Sulakatko, E. Liisma, and E. Soekov, “Increasing Construction Quality of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) by Revealing on-site Degradation Factors,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 38, pp. 765–772, 2017, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.160.
- [6] V. Sulakatko and I. Lill, “The economic relevance of on-site construction activities with the External Thermal Insulation Composite System (ETICS),” *Int. J. Strateg. Prop. Manag.*, vol. 23, no. 4, pp. 213–226, Mar. 2019, doi: 10.3846/IJSPM.2019.7071.
- [7] S. Ilomets, T. Kalamees, J. Lahdensivu, and P. Klõšeiko, “Impact of ETICS on Corrosion Propagation of Concrete Facade,” *Energy Procedia*, vol. 96, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.101.
- [8] S. Ilomets and T. Kalamees, “Case-study analysis on hygrothermal performance of ETICS on concrete wall after low-budget energy-renovation,” 2013.
- [9] S. Ilomets and T. Kalamees, “Evaluation of the criticality of thermal bridges,” *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 1, no. 1, p. 11, Dec. 2016, doi: 10.1007/s41024-016-0005-6.
- [10] S. Ilomets, K. Kuusk, L. Paap, E. Arumägi, and T. Kalamees, “Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 96–104, 2017, doi: 10.3846/13923730.2014.976259.
- [11] S. Ilomets, “Renovation Need and Performance of Envelopes of Concrete Apartment Buildings in Estonia,” Tallinn University of Technology, 2017.
- [12] K. Kuusk and T. Kalamees, “nZEB Retrofit of a Concrete Large Panel Apartment Building,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 985–990, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.038.
- [13] K. Kuusk, P. Pihelo, and T. Kalamees, “Renovation of apartment buildings with prefabricated modular panels,” 2019, doi: 10.1051/e3sconf/2019111030.
- [14] P. Pihelo, “Hygrothermal Performance of Prefabricated Timber Frame Insulation Elements for Deep Energy Renovation of Apartment Buildings,” TalTech Press, 2020.
- [15] P. Pihelo, T. Kalamees, and K. Kuusk, “nZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels,” *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 1006–1011, 2017, doi: 10.1088/issn.1742-6596.
- [16] P. Pihelo and T. Kalamees, “Development of prefabricated insulation elements for buildings with aerated autoclaved concrete walls,” in *12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020)*, Jun. 2020, vol. 172, p. 18001, doi: 10.1051/e3sconf/202017218001.
- [17] J. Vinha, “Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions: A method of determining a sufficient water vapour resistance of the internal lining of a wall assembly,” Tampere University of Technology, 2007.
- [18] P. Pihelo, M. Lelumets, and T. Kalamees, “Potential of Moisture Dry-out from Concrete Wall in Estonian Climate,” in *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering. 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*, 2016, pp. 289–298.

- [19] P. Pihelo, M. Lelumees, and T. Kalamees, “Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements,” in *SBE16 Tallinn and Helsinki Conference Build Green and Renovate Deep, SBE2016, 5-7 October 2016, Tallinn and Helsinki, in Energy Procedia*, 2016, vol. 96, pp. 745–755, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.137.
- [20] T. Ojanen, H. Viitanen, R. Peuhkuri, K. Lähdesmäki, J. Vinha, and K. Salminen, “Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials,” 2010.
- [21] P. Pihelo, K. Kuusk, and T. Kalamees, “Development and Performance Assessment of Prefabricated Insulation Elements for Deep Energy Renovation of Apartment Buildings,” *Energies*, vol. 13, no. 7, p. 1709, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13071709.
- [22] A. Tisov *et al.*, “Driving decarbonisation of the EU building stock by enhancing a consumer centred and locally based circular renovation process,” in *NSB 2020 12th Nordic Symposium on Building Physics*, 2020, p. 7.
- [23] P. O. Veld, “MORE-CONNECT: Development and Advanced Prefabrication of Innovative, Multifunctional Building Envelope Elements for Modular Retrofitting and Smart Connections,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1057–1062, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.026.

A1. Rakennusten elinkaartekniikka

Maanvastaisten seinärakenteiden sisäpuolissa korjauksissa käytettyjen suolankeräysrappausten pitkäaikaistoimivuus – seurantatutkimuksen tuloksia 16 vuoden jälkeen

Janne Sievola
Vahanan Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Tutkimuksen vertailtiin pitkäaikaisseurannalla eri suolankeräysrappaus-järjestelmiä, niiden rappauskerrosyhdistelmien ja rappauspaksuuksien vaikutuksia koekohteessa. Koealueet on tehty vuosina 2004 ja 2007. Koekohteena toimii Helsingin Punavuorella sijaitsevan Mikael Agricolan kirkon tornin massiivinen tiilimuuraus, jossa koealueet ovat tornin ulkoseinien sisäpinnalla noin 40 metrin korkeudessa maanpinnasta. Torni on meri-ilmastossa voimakkaasti suolarasitettu. Koealueilla on käytetty suolankeräysrappausten eri rappauskerrosyhdistelmiä, vedensulkulaasteja sekä myös kalkkisementtirappauksia. Viiden eri tuotevalmistajan koealueita on yhteensä 28 kappaletta. Tässä esityksessä on käsitelty tarkemmin vuoden 2007 koealueita ja lyhyesti vuoden 2004 koealueita.

Tähän mennessä osa suolankeräysrappauksista on toiminut 13 ja 16 vuotta. Osan suolankeräysrappausten suolankeräyskapasiteetti täyttyi 4-5 vuodessa. Vertailuna käytettyjen 30 mm paksujen kalkkisementtilaastien läpi suola kulkeutui 2-3 vuodessa sekä toisella alueella 5-6 vuodessa. 15 mm paksujen suolankeräysrappausten läpi suola kulkeutui 1-2 vuodessa, mikä osoittaa suolankeräysrappausohjeistuksien 20 mm vähimmäispaksuuden noudattamisen merkityksen. 15 mm rappauspaksuuden muodostama huokosverkosto on riittämätön suolan kiteytymiselle huokosiin ja varastoimiselle rappaukseen. Koealueiden eri materiaalikerrosten merkityksen tutkiminen edellyttää jatkoseurantaa.

1. Johdanto

Suolankeräyslaasteja ja vedensulkulaasteja käytetään pääasiassa maanperästä rakenteisiin nousevan kosteuden ja suolan hallitsemiseen. Tällaiset rakenteet ovat pääosin maanvastaista seinärakenteita. Suolankeräysrappausten toiminta perustuu rappauksen sisällä oleviin suuriin huokosiin ja yli 40 % kokonaishuokoisuuteen. Rappauksessa veteen liennut suola pääsee näissä huokosissa kiteytymään huokosiin kosteuden muuttuessa nesteestä vesihöyryksi. Suolankeräysrappauksissa on useita rappauskerroksia, joilla kullakin on omat ominaisuudet kosteuden ja suolan siirtymisessä. [1] Suolankeräysrappauksissa käytettävät kerrokset valitaan kosteus- ja suolarasituksen mukaan. [1] Vedentiivistyslaasteja käytetään tarpeen vaatiessa katkaisemaan rakenteessa siirtyvä nestemäinen vesi. Vedentiivistyslaastia käytetään myös alustan oikaisuun, jos esimerkiksi saumalaastit ovat tiilipintaa syvemmällä. Suolaa varastoivana näistä kerroksista toimivat huokoinen pohjalaasti ja huokoinen pintalaasti. Suolankeräysrappausten kerrospaksuudeksi voidaan valita 15-30 mm riippuen tuotteesta ja suolarasituksesta. Saksan WTA:n ohjeen mukaan vähimmäiskerrospaksuus on 20 mm [1, 2].

Yhtäläistä arviota suolankeräysrappauksen kestoikälle ei ole tiedossa. Rappauksen suolankeräyskyky ja siten käyttöikä riippuu rakenteen kosteusolosuhteista, suolarasituksen määrästä sekä rappauksen paksuudesta. Korjauksen käyttöikä määräytyy täysin kohdekohtaisesti. Kestoikään vaikuttaa huomattavasti rappauksen huokos rakenne ja huokostilavuus, joten rappaustyön toteutuksella on suuri merkitys korjauksen onnistumisessa. [2]

Tässä tutkimuksessa selvitettiin suolankeräysrappausjärjestelmien pitkäaikaistoimivuutta ja eri rappauskerrosten merkitystä toiminalle aistinvaraisella tarkastelulla sekä tarkastelemalla mikroskoopilla rappauksista otettujen näytepalojen suolakeräntymää.

2. Rappauskoealueiden pitkäaikaisseuranta

Koekohteena toimii Helsingin Punavuoressa sijaitsevan Mikael Agricolan kirkon tornin massiivinen tiilimuuraus, joka on sekä julkisivun että sisäpinnan osalta puhtaaksi muurattu. Koealueet ovat tornin ulkoseinien sisäpinnalla noin 40 metrin korkeudessa maanpinnasta. Tornin ulkoseinien sisäpinnalla esiintyy voimakasta suolan kerääntymistä. Kohde on rakennettu vuosina 1933–35. Seinärakenteen kokonaispaksuus on 750–800 mm. Julkisivukorjauksessa vuonna 2004 tornin ulkopinta muurattiin uudelleen noin 120 mm syvyydelle käyttäen vanhoja ja uusia tiilikiviä. Tornin tiilijulkisivu on meri-ilmaston voimakkaan viistosateen ja merestä peräisin olevan suolan rasittama. Suolainen sadevesi imeytyy muuraukseen, jossa veteen liennut suola siirtyy sisään päin kapillaarisesti, kunnes kosteus haihtuu muurauksen sisäpinnalla ja suola kiteytyy seinän pintaan. Tiilen pinnasta otetun suolanäytteessä on todettu pieniä määriä sulfaatteja, klorideja ja nitraatteja. [3]

2.1 Tutkimusten yleiskuvaus

Tutkimuksessa on 26 kappaletta noin 0,6 x 0,5 m² kokoista rappauskoealuetta viideltä materiaalitoimittajalta (kuva 1). Koealueet on tehty vuosina 2004 ja 2007. Tässä raportissa esitellään tarkemmin vuonna 2007 tehdyt koealueet ja esitellään vuonna 2004 tehdyt koealueet lyhyesti. Vuonna 2007 tehtiin 9 erilaista koealuetta kahden materiaalitoimittajan tuotteilla. Rappauskoealueissa selvitetään suolankeräysrappauksen eri kerrosten vaikutuksia, käytetään vertailualueena kalkkisementtirappausa sekä tutkitaan vedensulkulaastin toimintaa. Tarkemmin vuoden 2007 tärkeimmät koealueet on esitelty kohdassa 2.2 tulosten yhteydessä.



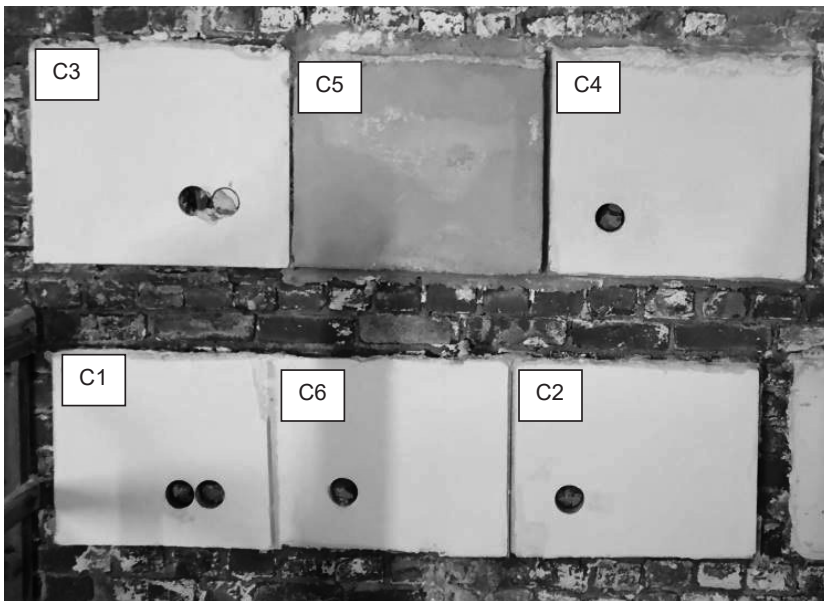
Kuva 1. Yleiskuva koealueista.

Rappauskoealueiden tarkastus on tehty lähes vuosittain vuodesta 2005 lähtien. Tarkastuksesta rappausalueet on tarkastettu aistinvaraisesti ja arvioitu onko pinnalla suolaa, rappauksen mahdollinen alustasta irtoaminen ja mahdolliset halkeamat. Tarkastuksissa on kartoitettu alueet pintakosteusilmaisimella (Caisson VD 1, asteikko 1...15) ja valokuvattu alueet. Tarkastuskäynneillä sisäilman olosuhteet ovat olleet seuraavat: lämpötila 5 – 22 °C, ilman suhteellinen kosteus RH 62...85 % ja absoluuttinen kosteus 4,9...14,9 g/m³.

Vuonna 2018 Saint-Gobain Finland Oy koealueiden suolankerääntymistä arvioitiin ø70 mm poralieriönäytepaloista mikroskoopin avulla. Näytteet halkaistiin ja niitä arvioitiin mikroskopoimalla stereomikroskoopilla.

2.2 Vuoden 2007 koealueet ja tulokset

Alla on esitetty Saint-Gobain Finland Oy ja Procoat Paints Oy:n tuotteiden merkittävimpien koealueiden rappauskerrosten tutkimustyyppit, tietoa tutkittavista rappauskerroksista ja koealueiden tilanne 15.1.2021. Valokuvat koealueista 15.1.2021 tarkastuksen yhteydestä on esitetty kuvissa 2 ja 3.



Kuva 2. Valokuvat materiaalitoimittajan Saint-Gobain Finland Oy:n tuotteiden koealueista 15.1.2021. Koealueet on esitetty numeroituna (C1-C6).

C1. Suolankeräysrappaus: tasoituslaastin päällä puolipeittävä tartuntalaasti

- Tutkitaan tartuntalaastin alustan peittävyuden merkitystä. Suolankeräysrappausohjeistukset suosittelivat puolipeittävä tartuntakerrosta (vertaa koealue C2).
- Alustana suolankeräysrappaukselle noin 10 mm tasoituslaasti, jonka päällä puolipeittävä tartuntalaasti.
- Rappaus toiminut tähän mennessä 13 vuotta, eikä suolaa ole esiintynyt rappauksen pinnalla. Vuonna 2021 pintakosteusilmaisimen lukemat olivat alhaisia (lukemat 5-6).

C2. Suolankeräysrappaus: tasoituslaastin päällä peittävä tartuntalaasti

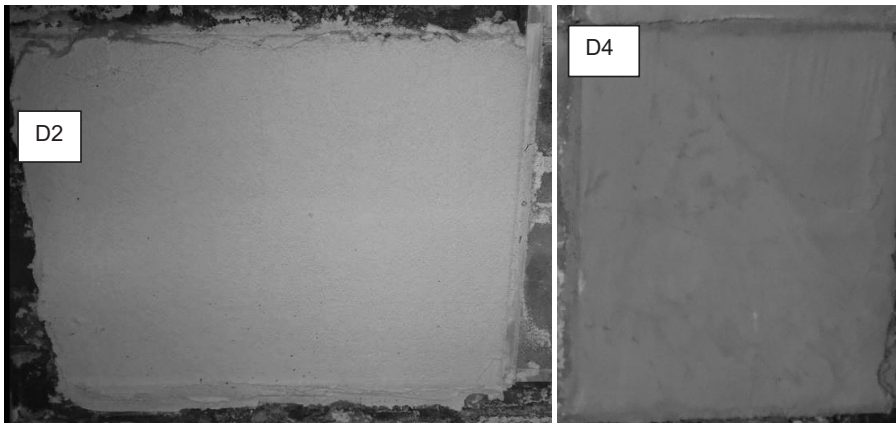
- Tutkitaan mikä vaikutus on kun tehdään peittävä tartuntalaastikerros (vertaa koealue C1). Siirtyykö kosteus ja kosteuden mukana suola eri tavalla kuin puolipeittävässä tartuntarappauksessa?
- Alustana noin 10 mm tasoituslaasti, jonka päällä 5 mm tartuntalaasti.
- Rappaus toiminut tähän mennessä 13,5 vuotta, eikä suolaa ole esiintynyt rappauksen pinnalla. Vuonna 2021 pintakosteusilmaisimen lukemat olivat alhaisia (lukemat 4-5).

C3. Suolankeräysrappaus: vedentiivistyslaastin vaikutus suolan siirtymiseen

- Tutkitaan kulkeutuuko suola vedensulkulaastin läpi suolankeräyskerrokseen, kun vedentiivistyslaastilla estetään nestemäisen kosteuden kulkeutuminen.
- Alustana ohut kerros tasoituslaastia, jonka päällä 2-3 mm paineellisen veden eristävä vedentiivistyslaasti
- Rappaus toiminut tähän mennessä 13,5 vuotta, eikä suolaa ole esiintynyt rappauksen pinnalla. Vuonna 2021 pintakosteusilmaisimen lukemat olivat alhaisia (lukemat 5-6).

C5. Kalkkisementtirappaus

- Vertaillaan miten valittu kalkkisementtirappaus toimii suolarasituksessa.
- Rappauksena 30 mm paksuinen kalkkisementtirappaus
- Vuonna 2013 suola kulkeutui rappauksen pinnalle (kuuden vuoden jälkeen). Vuonna 2021 alueella on tasaisesti osittain peittävää suolahärmettä.



Kuva 3. Valokuvat materiaalitoimittajan Procoat Paints Oy tuotteiden koealueista D2 ja D4 15.1.2021.

D2. Suolankeräysrappauksen toimivuus

- Vertaillaan ohjeistuksen mukaisen 20 mm paksuisen suolankeräysrappaustuotteen toimivuutta sekä tartuntalaastikerrosta, joka puolipeittävä ja osin kokonaan peittävää.
- Suolankeräysrappaus on toiminut tähän mennessä 13 vuotta, eikä suolaa ole esiintynyt rappauksen pinnalla. Vuonna 2021 pintakosteusilmaisimen lukemat olivat matalia (lukemat 3-4). Tartuntalaastien välillä ei havaittu eroa.

D4. Paksun vedensulkulaastin toimivuus

- Tutkitaan vedensulkulaastin toimivuutta.
- Sulkulaastikerros tehtiin kolmena rappauskerroksena, joista kaksi ensimmäistä kerrosta halkeili kuivumisen aikana.

- Sulkulaastirappaus on monin paikoin alustasta irti. Alustasta irtoaminen on havaittu pienellä alueella vuonna 2008 ja laajempaan vuonna 2011.
- Alustasta irtoamisesta huolimatta sulkulaasti toiminut tähän mennessä 13 vuotta, eikä suolaa ole esiintynyt rappauksen pinnalla. Ajoittain pintakosteusilmaisimen lukemat ovat olleet koholla (vaihteluväli 4-13). Vuonna 2021 pintakosteusilmaisimen lukemat olivat matalia (lukemat 6).

Rappausten mikroskooppitarkastelun tulokset

Saint-Gobain Finland Oy:n tuotteiden suolankeräysrappaus- ja kalkkisementtilaastikerroksissa havaittiin useita suolakiteillä täyttyneitä isoja huokosia. Suolan kerääntymisen sijaintia (suolarintamaa) rappauksen sisällä arvioitiin ja havaittiin, että suolaa on myös rappauksessa tilan sisäpinnan lähellä. Rappausten pintalaasteissa oli havaittavissa keskimäärin enemmän suolaa, kuin rappausten keskiosassa. Havaittiin myös, että laastikerroksissa on paljon huokosia, joissa ei ole suolaa. Mikroskopoinnilla eri rappausten välillä ei pystytty tekemään vertailuja suolan kerääntymisen eroista tai huokosten täyttymisasteesta. Myös sulkulaastien huokosissa havaittiin suolakiteitä. Kalkkisementtilaasteissa ei mikroskopoimalla havaittu merkittävää eroa suolankertymisessä verrattuna suolankeräyslaastiin.

2.3 Yhteenveto vuoden 2004 koealueista

Vuoden 2004 koealueilla yhden materiaalitoimijana tuotteilla suolankeräysrappaukset ovat toimineet 30 mm paksuisina 16 vuotta. Kahden materiaalitoimittajan 30 mm paksujen suolankeräysrappausten osalta suola kulkeutui rappauksen läpi 3-4 vuodessa ja 15 mm paksujen suolankeräysrappausten läpi suola kulkeutui 2-3 vuodessa. Vertailuna käytettyjen 15 mm ja 30 mm paksujen kalkkisementtilaastien läpi suola kulkeutui 2-3 vuodessa. Lyhyt-ikäisten ja edelleen toimivien suolankeräysrappausten materiaalieroista ei ole tietoa.

2.4 Johtopäätökset

Tulokset osoittavat suolankeräysrappausten toimivuuden 30 mm paksuisina. Osa suolankeräysrappauksista toimii edelleen 13 tai 16 vuoden jälkeen. Kahden tuotteen suolankeräyskapasiteetti 30 mm paksuisina täyttyi 3-4 vuodessa. Vertailuna toimivien kalkkisementtirappauksien läpi suola kulkeutui osin 2-3 vuodessa ja osin 5-6 vuodessa. Kalkkisementtirappauksissa ei ole esiintynyt kuitenkaan muita vaurioita, joten ne toimivat ns. suolaa kuljettavina rappauksina. Tulokset osoittavat, että 15 mm paksun suolankeräyslaastin suolankeräyskapasiteetti on moninkertaisesti lyhytikäisempi kuin 30 mm paksun rappauksen. Tulos viittaa myös suolankeräysrappausohjeistuksien 20 mm vähimmäispaksuuden noudattamisen olevan tarpeen.

Eri suolankeräysrappauskerrosten vaikutuksien ja erojen selvitys edellyttää jatkoseurantaa. Suolankeräysrappauksen puolipeittävän tartuntalaastin (alue C1) pintakosteuslukemat viittaavat mahdollisesti hieman korkeampaan kosteuteen kuin kauttaaltaan peittävällä tartuntalaastilla (alue C2). Tämän perustella suolankeräysrappauksen kauttaaltaan peittävällä tartuntalaastilla saattaa olla se vaikutus, että kosteus kulkeutuu hitaammin suolankeräysrappaukseen kuin puolipeittävällä tartuntalaastilla. Koealueen seuranta on jatkettava huomioiden, että kosteus- ja suolarasituksen paikalliset vaihtelut voivat vaikuttaa havaintoihin.

Poratuista rappauslieriökappaleista mikroskoopin avulla on haastava arvioida suolan kerääntymisen määrää. Kuitenkin suolan esiintyminen suolankeräysrappausten pintaosissa viittaa siihen, että huokosverkostossa on myös paljon pieniä huokosia, jotka toimivat kosteutta ja suolaa

siirtävinä huokosina. On myös mahdollista, että huokoisessa pohjalaastissa on suurempi huokoskapasiteetti, jonka johdosta siinä havaittiin huokosissa vähemmän suolaa kuin huokosessa pintalaastikerroksessa. Lisäksi on mahdollista, että rappauksen suolankeräyskapasiteetti on päättymässä, mikä edellyttää jatkoseurantaa. Sulkulaastikerroksien huokosissa havaittu suola viittaa siihen, että jossain määrin suola kulkeutuu myös sulkulaastin läpi, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että sulkulaastit eivät täysin pidätä vettä.

Procoat Paints Oy:n vedensulkulaastin irtoaminen alustasta johtuu todennäköisesti asennusvaiheessa kuivumisen aikana ensimmäisten vedeneristyskerrosten halkeilusta. Muuten sulkulaastikerros on toiminut tähän mennessä 13 vuoden ajan.

Tutkimus on käytännönläheinen pitkäaikaisseurantatutkimus ja on tuloksiltaan suuntaa antava. Koealueet ovat yksittäisiä, joten asennusvirheet voivat jonkin verran vääristää tuloksia. Suolarasitus voi vaihdella tutkimusalueiden välillä, kun viereiset koealueet ja viereinen rappaamaton avoin tiilipinta voivat vaikuttaa paikallisesti kosteuden siirtymiseen. Joka tapauksessa koko seinärakenteen suolarasitus on merkittävä, vaikkakaan sen määrää ei voida tarkasti arvioida.

3. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa osa suolankeräysrappauksista 20 mm tai 30 mm paksuisina on tähän mennessä toimineet 13 ja 16 vuotta. Osan suolankeräysrappausten suolankeräyskapasiteetti täyttyi 3-4 vuodessa. Vertailuna käytettyjen 30 paksujen kalkkisementtilaastien läpi suola kulkeutui 2-3 vuodessa sekä toisella alueella 5-6 vuodessa. 15 mm paksujen suolankeräysrappausten läpi suola kulkeutui 1-2 vuodessa, mikä osoittaa suolankeräysrappausohjeistuksien 20 mm vähimmäispaksuuden noudattamisen olevan tarpeen.

Osalle suolankeräys- ja kalkkisementtilaastirappauksista tehtyjen näytepalojen mikroskopoinnin perusteella ei havaittu rappauksen sisällä erillistä suolarintamaa vaan suolaa esiintyy rappauksen huokosissa pohjasta pintaan. Havainto viittaa todennäköisimmin siihen, että suola kerääntyy tasaisemmin koko rappaukseen paksuudelta eri kokosiin huokosiin ja/tai siihen, että huokoisessa pohjarappauksessa on suurempi kapasiteetti suolalle kuin pintarappauksessa. On myös mahdollista, että rappauksen suolankeräyskapasiteetti on päättymässä, joka vaatii jatkoseurantaa.

Erityyppiset vedensulkulaastikerrokset ovat kestäneet asennusaikaisesta pohjakerrosten halkeilusta huolimatta tähän mennessä 13 vuotta. Suola kulkeutuu kuitenkin jossain määrin myös vedensulkulaastin läpi johtuen todennäköisesti siitä, että sulkulaastit eivät täysin pidätä vettä.

Lähdeluettelo

- [1] Frössel, Frank. 2007, *Masonry Drying and Cellar Rehabilitation*, Stuttgart. 277 s.
- [2] Palviainen Tiina, 2010. *Diplomityö, maanvastaisten rakenteiden kosteuden hallinta sisäpuolisilla korjausmenetelmillä*. Tampere, Tampereen Tekninen Yliopisto. 122 s.
- [3] Sievola, Janne. 2007. *Tiilimuraus kosteus- ja suolarasituksessa, Suolankeräyslaastikokeet*. Espoo, Teknillinen korkeakoulu. s. 44.

Rakennuksen teknis-taloudellis-ilmastollinen elinkaaritarkastelu

Arto Toorikka
Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Vahanen-yhtiöiden kehittämän elinkaaritarkastelun tavoitteena on määrittää olemassa olevalle rakennukselle potentiaaliset korjaus- tai purku- ja uudisrakentamisvaihtoehdot sekä tuottaa keskenään vertailukelpoista tietoa näiden vaihtoehtojen kustannuksista ja kasvihuonekaasupäästöistä pidemmällä tarkastelujaksolla. Vaihtoehdot pohjautuvat rakennuksen teknisen kunnan perusteella määritettyihin korjaustarpeisiin sisältäen koko tarkasteltavalle elinkaarelle määritetyt korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteet aikataulutuksineen.

Verrattuna esimerkiksi pelkkään hankevaihtoehtojen ilmastovaikutusten selvittämiseen, hankkeeseen ryhtyvä pystyy tämän tyyppisen laaja-alaisen elinkaaritarkastelun perusteella arvioimaan kokonaisuutta luotettavammin ja tekemään päätökset rakennuksen toimenpiteistä ja toimenpiteiden ajankohdista.

1. Johdanto

Artikkelissa esitetään rakennuksen elinkaaren sekä teknis-taloudellis-ilmastollisen elinkaaritarkastelun osa-alueet ja käsitellään näistä muodostuvaa kokonaisuutta. Kokonaisuutta voidaan tarkastella eri näkökulmista, jotka täydentävät toisiaan. Artikkelin perustuu pääosin elinkaaritarkasteluiden tekemisestä kertyneisiin kokemuksiin ja kirjoittajan sekä Vahanen-yhtiöiden kollektiiviseen tietotaitoon.

2. Näkökulmia rakennuksen elinkaaren kokonaisuuteen

Rakentamisessa elinkaaren on usein ajateltu jakautuvan esimerkiksi suunnitteluun, rakentamiseen, käyttöön ja purkuun. Esimerkiksi suunnitteluvaihe voidaan jakaa edelleen esimerkiksi tarve-, hanke-, yleis-/luonnos-, toteutus ja rakennusaikaiseen suunnitteluun sekä käyttöönottoon. Keskeistä on se, että rakentamista voidaan ajatella projektina, jolla on alku ja loppu ja eri vaiheet kuvaavat tämän projektin eri vaiheita.

Elinkaarikustannuslaskennassa arvioidaan elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia ja rakennuksen elinkaari jaetaan yleensä vastaaviin vaiheisiin kuin rakentamisessa. Erityistä on se, että mitä aikaisemmassa vaiheessa rakentamisen projektia sen sisältöön vaikuttavia päätöksiä tehdään, sitä suurempi merkitys niillä tyypillisesti on hankkeen kokonaiskustannuksiin. Lisäksi esimerkiksi rahan aika-arvo huomioiden, mitä myöhemmin kustannukset syntyvät, sitä edullisemmat kokonaiskustannukset tyypillisesti ovat.

Rakennuksen ilmastovaikutuksia arvioitaessa elinkaari jaetaan usein valmistukseen, käyttöön ja elinkaaren loppuun. Esimerkiksi Ympäristöministeriön kesäkuussa 2021 julkaisemassa vähähiilisyysarviointimenetelmän luonnoksessa jakona on: A Ennen käyttöä, B Käytön aikana, C Käytön jälkeen ja lisäksi D Muut vaikutukset [1]. Näistä esimerkiksi käytön jälkeinen elinkaari on jaettu edelleen vaiheisiin C1 Purkutytöt, C2 Kuljetukset käsittelyyn, C3 Jätteenkäsittely ja C4 Loppusijoitus [1].

Rakennuksen elinkaarelle voidaan siis määrittää eri perustein erilaisia vaiheita ja niillä on tarkasteltavasta näkökulmasta riippuen erityyppisiä merkityksiä. Jokainen elinkaaren vaihe ja näkökulma sisältää omat erityispiirteensä.

Rakennus itsessään on monimuotoinen kokonaisuus, joka kytkeytyy myös ympäröivään maailmaan lukemattomin tavoin. Tällä perusteella rakennusta ei voi kokonaisvaltaisesti tarkastella yhdestä näkökulmasta ja/tai yhdistää eri näkökulmia yhteen ilman näiden näkökulmien välistä todellista vuoropuhelua. Jotta rakennusta ja esimerkiksi sen vaihtoehtoisia elinkaaren jatkumoa voitaisiin tarkastella kokonaisuutena, tulee myös itse tarkastelu tehdä siis kokonaisvaltaisesti eikä sitä voi koostaa irrallisista osakokonaisuuksista.

Kokonaisvaltaisen tarkastelun perusteella olemassa olevalle rakennukselle, jossa on merkittäviä korjaustarpeita, voidaan valita esimerkiksi toisistaan merkittävästi poikkeavia potentiaalisia elinkaaren jatkumoa, kuten

- tehdään käyttöä ylläpitäviä korjauksia heti ja peruskorjaus 10 vuoden kuluttua
- tehdään peruskorjaus heti
- puretaan rakennus ja rakennetaan vastaava uudisrakennus heti
- puretaan rakennus ja rakennetaan erilainen uudisrakennus heti.

Jokainen vaihtoehto kannattaa optimoida erikseen ja usein eri vaihtoehtoilta on erilaisia hyviä ja huonoja puolia. Vaihtoehtoja vertailemalla voidaan valita, mitä rakennukselle tehdään.

3. Tekninen elinkaaritarkastelu

Jotta olemassa olevan rakennuksen tulevan elinkaaren kustannuksista tai ilmastovaikutuksista voidaan tehdä luotettavia arvioita, tulee ensin tuntea rakennuksen tekninen nykytila. Teknisen kunnan ja korjaustarpeiden perusteella rakennukselle voidaan määrittää todellisuudessa toteutuskelpoisia ja suositeltavia vaihtoehtoisia elinkaaren jatkumoa. Kun toteutustavat, kunto ja korjaustarpeet tunnetaan riittävän tarkasti, voidaan myös esimerkiksi energian kulutusta ja tulevia korjaustarpeita nykytilanteen muutosten jälkeen arvioida luotettavasti. Usein osana teknistä tarkastelua selvitetään käyttäjien ja muiden sidosryhmien käyttötarpeet.

Vahanen-yhtiöiden kehittämässä laaja-alaisessa elinkaaritarkastelussa rakennuksen todelliset korjaustarpeet selvitetään tarpeellisin kuntotutkimuksin ja moniammatillisin asiantuntija-arvioin. Korjaukset voidaan yleensä ajoittaa eri vaiheisiin rakennuksen elinkaarta. Esimerkiksi sisäilmaongelmaisissa rakennuksissa on usein tarvetta kiireellisille korjauksille, mutta joitakin muita toimenpiteitä voi olla tarkoituksenmukaista tehdä vasta myöhemmin laajemman kokonaisuuden yhteydessä. Toisaalta rakennuksen laajamittaisen korjauksen yhteydessä ei yleensä ole tarkoituksenmukaista uusia sellaisia rakennuksen osia, joilla on vielä runsaasti käyttöikä jäljellä. Tällöin näiden uusiminen voi olla ajankohtaista myöhemmin rakennuksen käytön jatkuessa. Joskus purkaminen ja uudisrakentaminen saattaa olla peruskorjausta kannattavampi vaihtoehto. Elinkaaritarkastelussa esitetään eri vaihtoehtojen keskeiset korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteet koko tarkastelujaksolla kustannuksineen ja ajoituksineen. Tarkastelujakson jälkeistä purkua ei ole yleensä sisällytetty arvioon, vaan elinkaaren on ajateltu edelleen jatkuvan myös tarkastelujakson jälkeen. Elinkaaritarkastelu soveltuu parhaiten tehtäväksi rakennushankkeen tarve- ja hankesuunnitteluvaiheiden alussa.

Eri vaihtoehtoisissa kannattaa huomioida rakennuksen (tai rakennusryhmän) nykyiset sekä arvioidut tulevat käyttötarpeet. Mikäli esimerkiksi koulurakennuksessa olisi palveluverkkoselvityksen perusteella tarvetta suuremmalle oppilasmäärälle, voidaan vertailua

tehdä olemassa olevan rakennuksen korjauksen, korjauksen ja laajennuksen sekä eri laajuisen purkavan uudisrakentamisen välillä.

4. Taloudellinen elinkaaritarkastelu

Taloudellisella elinkaaritarkastelulla tarkoitetaan elinkaarikustannuslaskentaa, missä mitataan rakennuksesta aiheutuvia kustannuksia (ei tuloja) halutun pituisen tarkastelujakson aikana. Keskeisenä voidaan pitää sitä, että tulevaisuuteen sijoittuvat kustannukset yhteismitallistetaan netto nykyarvoon diskonttaamalla. Elinkaarikustannuslaskennan yksityiskohtaiset menetelmät vaihtelevat muun muassa tekijästä, kohteesta, laskennan käyttötarkoituksesta ja käytössä olevissa resursseista johtuen. Myös Vahanen-yhtiöiden toimintamallissa hyödynnetään vaihtelevia laskentamenetelmiä.

Vahanen-yhtiöiden toimintamallissa elinkaarikustannuslaskenta tehdään yhdessä muiden elinkaaritarkastelun osa-alueiden kanssa. Kustannuslaskentaa tehdään siis vain vaihtoehdoille, jotka on perustellusti valittu mukaan tarkasteluun.

4.1 Kustannukset ja laskentamenetelmät

Rakennuksesta aiheutuvat kustannukset voidaan jakaa esimerkiksi seuraavasti:

- Rakentamis- ja korjauskustannukset
- kunnossapito- ja käyttökustannukset
- purkukustannukset.

Rakentamis- ja korjauskustannukset ovat kertaluonteisia tai pitkillä aikaväleillä toistuvia yksittäiserinä merkittäviä investointeja. Uudis- ja korjausrakentamiskustannuksia arvioidaan pääsääntöisesti pinta-alaperusteisesti, tavoitehintalaskennalla, rakennusosa-arviolla tai suoritte pohjaisella kustannusarviolla. Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa eri vaihtoehtojen uudisrakentamiskustannuksia arvioidaan useimmiten tavoitehintalaskennalla tai pinta-alaperusteisesti vastaavista hankkeista olevien toteutumatiетоjen perusteella. Korjauskustannuksia arvioidaan useimmiten sovelletulla rakennusosa-arviomenetelmällä tai tavoitehintalaskennalla.

Kunnossapitokustannukset ovat säännöllisiä ja yksittäiserinä kohtalaisen vähäisiä, mutta elinkaaren ajalla merkittäviä kustannuksia. Kunnossapitokustannuksia voidaan arvioida esimerkiksi kokemusperäiseen tietoon, tilastotietoon sekä toteutuneista korjausprojekteista kerättyyn tietoon perustuen. Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa rakennukselle laaditaan koko tarkastelujaksolle tekninen kunnossapito-ohjelma, missä on eritelty jokaiselle vuodelle kohdistuvat merkittävimmät kunnossapitotoimenpiteet kustannuksineen.

Käyttökustannuksista merkittävin osa muodostuu yleensä rakennuksen energiankulutuksesta (lämmitys, jäähdytys, kiinteistö sähkö). Energiankulutus arvioidaan yleensä joko toteutumatiөdon ja tulevien muutosten vaikutusten laskennan perusteella sekä hankkeelle asetettujen tavoitteiden perusteella. Vaihtoehtoisesti energiankulutus voidaan arvioida laatimalla vaihtoehtoisille rakennuksille energiatodistukset. Energian hinta (tarkasteluvuonna) perustuu yleensä kiinteistön omistajalta saatuun tietoon.

Rakennuksen käytön aikana kustannuksia aiheutuu kunnossapidon ja energian lisäksi tyypillisesti esimerkiksi kiinteistöhuollosta, käyttö- ja jätevedestä, kiinteistöverosta, hallinnosta ja muista tekijöistä. Nämä tekijät ovat elinkaaren jatkumon vaihtoehtojen vertailun kannalta tyypillisesti kohtalaisen vähämerkityksisiä ja niiden tarkka arviointi lisääisi elinkaaritarkastelun laatimisen

työmäärää suhteessa varsin paljon. Näistä syistä näitä kustannuksia ei tyypillisesti ole huomioitu Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa. Jos kustannuksia on sisällytetty, ovat kustannukset perustuneet tilastotietoihin, rakennuksen omistajaorganisaatiolta tai sidosryhmiltä saataviin tietoihin.

Purkukustannukset on kohtalaisen merkittävä, yleensä yksittäiseränä käsiteltävä kustannus, mikä pitää sisällään kaikki purkamiseen, jätteenkäsittelyyn ja loppusijoitukseen liittyvät kustannukset. Purkukustannukset voidaan arvioida rakennuksen laajuuteen, sijaitiin, rakennustyyppiin, runkoratkaisuun, rakennuksen ikään sekä haitta-aineiden esiintyvyyteen perustuen. Arviointi tehdään useimmiten vastaavista kohteista olevaan kokemusperäiseen tietoon perustuen ja arviota voidaan tarvittaessa varmentaa esimerkiksi purku-urakoitsijan hinta-arvion perusteella.

4.2 Rahan aika-arvo ja kustannusten muutos ajan suhteen

Rahan aika-arvo huomioidaan diskonttaamalla, mikä tarkoittaa tietyn ajan kuluttua erääntyvän maksun nimellisarvon muuntamista nykyarvoksi. Diskonttaamisen tarkoitus on yhteismitallistaa tarkastelujakson aikana syntyvät kustannukset elinkaaritarkastelun laatimishetken arvoon (nykyarvo). Diskonttokorossa huomioidaan myös rahoituskustannukset ja yleisen inflaation vaikutukset kustannuksiin.

Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa käytetään tyypillisesti useita vaihtoehtoisia diskonttokorkokantoja. Vaihtoehtoisia korkokantoja käyttämällä voidaan tehdä herkkystarkastelua korkokannan vaikutusten huomioimiseksi tuloksissa.

Energia-, rakentamis-, korjaus- ja kunnossapitokustannusten kustannustason muutosta tulevaisuudessa on tarkasteltu vastaavasti vaihtoehtoisilla vuosittaisilla prosentuaalisilla korotuksilla suhteessa tarkasteluvuoden kustannustasoon. Kustannusten kehityksen arvioimiseen liittyy runsaasti epävarmuustekijöitä.

Vertailun vuoksi laskennan tulokset esitetään myös ilman diskonttokorkoa sekä energia-, rakentamis-, korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteiden kustannustason indeksikorotusta.

Kun elinkaarikustannuslaskenta tehdään pitkälle aikavälille, on hyvä huomioida, että mitä pidemmällä tulevaisuudessa olevia arvioita tehdään, sitä enemmän niihin liittyy muutoksista johtuvia epävarmuustekijöitä. Epävarmuudet liittyvät kustannusten kehittymisen ohella vahvasti myös esimerkiksi rakennuksen käyttötarpeen mahdollisiin muutoksiin.

5. Ilmastollinen elinkaaritarkastelu

Rakennuksen elinkaariarviointia on tehty Suomessa yksityiskohdiltaan hieman vaihtelevin menetelmin (esimerkiksi RTS, LEED ja BREEAM ympäristöluokitukset, EU:n Level(s) -menetelmä). Osana maankäyttö- ja rakennuslainsäädännön uudistusta rakennusten hiilijalanjälkeä on tarkoitus alkaa säännellä Suomessa ja hiilijalanjälkilaskelmaa tultaneen tulevaisuudessa vaatimaan rakennusluvan yhteydessä [2].

Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa ilmastollinen tarkastelu eli vähähiilisyden arviointi on tehty soveltaen ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän luonnosversiota [1]. Ohjetta sovelletaan esimerkiksi siten, että tarkastelujakson pituus saattaa poiketa ohjeen mukaisesta. Laskennassa käytetään arvioituja tietoja, jotka ovat osittain yleistasonia ja vastaavat elinkaarikustannuslaskennassa käytettyä tasoa. Laskennassa

hyödynnetään elinkaarilaskentaan tarkoitettua OneClick LCA -ohjelmaa.

Tuotteiden valmistuksen ja rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa huomioidaan merkittävistä rakentamistoimenpiteistä ja uudisrakentamisesta syntyvät päästöt. Päästökertoimina käytetään kansallisen päästötietokannan [3] arvoja ja OneClick LCA -ohjelman kirjaston sisältämiä tuote- tai tuoteryhmäkohtaisia arvoja.

Rakennuksen käytön aikaisten päästöjen laskennassa huomioidaan rakennustuotteiden vaihtoista syntyvät päästöt. Keskimääräiset rakennustyyppiikohtaiset päästöt huomioidaan laskentatyökalun oletusarvoilla ja lisäksi merkittävimmille / tavanomaisesta poikkeaville käytön aikaisille korjaustoimenpiteille lasketaan erikseen päästöt.

Rakennuksen energiankulutus perustuu samaan arvioon kuin kustannuslaskennassa käytetty arvio. Energiankulutuksen päästöt huomioidaan kansallisen päästötietokannan mukaisilla tulevaisuuden skenaarioiden päästökertoimilla [3].

Purkamisen päästöt lasketaan OneClick LCA -ohjelmalla esimerkiksi Carbon designer ominaisuutta hyödyntäen rakennuksen tyyppiominaisuuksien perusteella. Nykyisin rakennuksessa olevien purettavien materiaalien määriä ja päästöjä ei lähtökohtaisesti huomioida laskelmissa.

Muiden vaikutusten (hiilikädenjälki) arviointia ei tehdä laskelmiin, mutta sitä voidaan arvioida esimerkiksi sanallisesti.

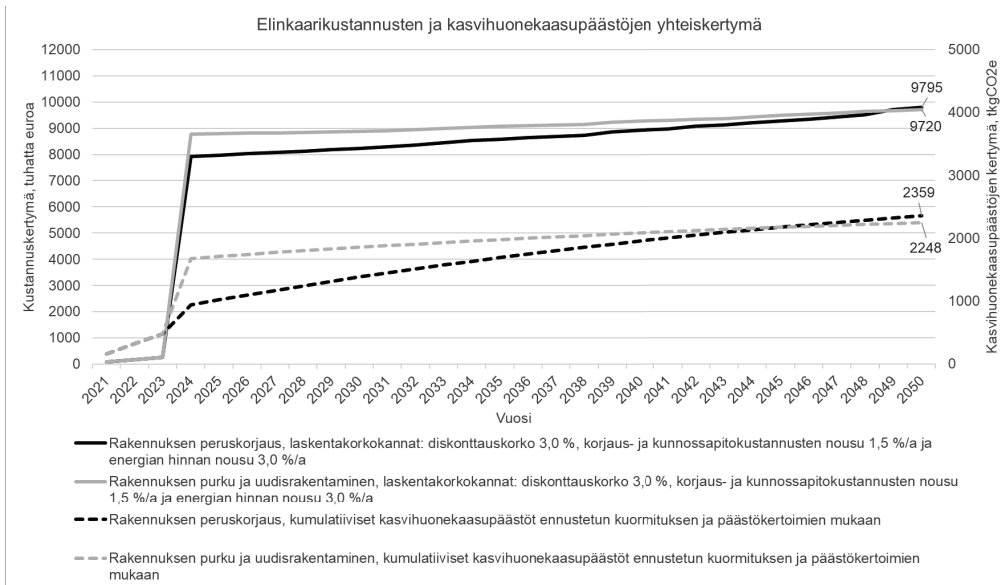
6. Elinkaaritarkastelun tulosten esitys

Vahanan-yhtiöiden elinkaaritarkastelussa tärkeimmäksi tulosten esitystavaksi ovat vakiintuneet kumulatiiviset kuvaajat. Niistä eri vaihtoehtojen kustannusten ja hiilijalanjäljen kertymää voi vertailla sekä arvioida vaihtoehtoihin kulutettavien resurssien kertymisen elinkaaren aikana ja niiden tulkitseminen on koettu palautteen mukaan helppona ja intuitiivisena. Esitystavan voidaan myös katsoa helpottavan tilaajan päätöksentekoa eri vaihtoehtoja tarkasteltaessa. Kuvaajien lisäksi käytetyt lähtötiedot ja yksityiskohtaiset tulokset esitetään esimerkiksi taulukkomuodossa.

Kuvassa 1 on esimerkki tulosten esitystavasta eräässä kohteessa. Kohteen elinkaaritarkastelu laadittiin vuonna 2021 ja siinä vertailtiin kahta vaihtoehtoista elinkaaren jatkumoa 30 vuoden tarkastelujaksolla. Toisessa vaihtoehdossa rakennus peruskorjattaisiin ja toisessa tehtäisiin purkava uudisrakentaminen vuonna 2024.

Kuvan 1 esimerkissä peruskorjaus on 30 vuoden tarkastelujakson lopussa sekä euromääräisesti, että ilmastovaikutusten perusteella heikompi vaihtoehto kuin purkava uudisrakentaminen, mutta ero on varsin vähäinen. Lyhyemmällä aikavälillä peruskorjaus taas on vertailun perusteella selkeämmin suositeltavampi vaihtoehto. Erot johtuvat pääosin peruskorjauksen rakennustoimenpiteiden uudisrakentamista pienemmistä ja käyttövaiheen suuremmista kustannuksista ja kasvihuonekaasupäästöistä. Mikäli päätöksentekoa ohjaavana tekijänä olisivat esimerkiksi mahdollisimman pieni kasvihuonekaasupäästöjen ja kustannusten kertymä vuoteen 2035 mennessä, olisi peruskorjaus kuvan 1 perusteella suositeltavampi vaihtoehto.

Laskelmien tulosten ohella päätöksenteossa tulee huomioida myös muut tekijät, kuten uudisrakennuksen usein tarjoamat muuntokelpoisemmat ja joustavammat sekä tehokkaammat tilat.



Kuva 1. Esimerkki tulosten esittämisestä kumulatiivisina kuvaajina eräässä kohteessa, missä elinkaaren vaihtoehtoina tarkasteltiin raskasta peruskorjausta ja purkavaa uudisrakentamista.

Vaihtoehtojen vertailtavuutta parantaa tulosten esittäminen useammassa yksikössä. Esimerkiksi pinta-alayksikköön perustuva tulos verrattuna kokonaiskertymään tai käyttäjämäärään suhteutettuun tulokseen voi tuottaa toisistaan merkittävästi poikkeavilta vaikuttavia tuloksia.

Vahanen-yhtiöiden elinkaaritarkastelun kuvaajissa esitetään erityyppisiä tietoja, kuten

- elinkaarikustannusten ja kasvihuonekaasupäästöjen yhteiskertymä (kuvan 1 mukaisesti)
- elinkaarikustannukset ja kasvihuonekaasupäästöt pinta-alayksikköä kohden
- elinkaarikustannukset ja kasvihuonekaasupäästöt rakennuksen henkilömitoituksen suhteen
- eri vaihtoehtojen kustannukset vaihtoehtoisilla korkokannoilla
- kustannukset eri kustannuseriin jaoteltuna
- hiilijalanjälki eri vaiheisiin jaoteltuna.

7. Yhteenveto

Rakennuksen elinkaaren tekninen, taloudellinen ja ilmastollinen näkökulma täydentävät toisiaan, ja nämä kaikki osa-alueet huomioiva laaja-alainen elinkaaritarkastelu voi tarjota selkeän kokonaiskuvan rakennuksen elinkaaren jatkosta päättämistä varten. Tulosten tarkastelu on kannattavaa tehdä kumulatiivisten kuvaajien avulla ja laskennan lisäksi päätöksenteossa tulee arvioida muut vaihtoehtojen eroavaisuudet ja epävarmuustekijät.

Lähdeluettelo

- [1] Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2021, luonnos lausuntokierrosta varten, 6/2021. 2021. Ympäristöministeriö.
- [2] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ilmastoselvityksestä, luonnos 4.6.2021. 2021. Ympäristöministeriö.
- [3] Rakentamisen päästötietokanta. Suomen Ympäristökeskus. Verkkosivusto, saatavilla: <https://co2data.fi/>

Tuulivoimaloiden perustusten käyttöikä

Niko Lindman ja Jukka Lahdensivu
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa betonin pakkasenkestävyyttä on pyritty parantamaan lisähuokostuksella. Suomessa lisähuokostimien käyttö yleistyi 1980-luvulla. Tästä huolimatta lisähuokostamattomia rakenteita tai rakenteita, joissa lisähuokostus on epäonnistunut, on rakennettu myös tämän jälkeen. Vuosien 2017 ja 2018 aikana Suomessa oli ns. betonikriisi, joka johtui liiallisesta huokostimen käytöstä. Tämän seurauksena betoni muodostuu liian huokoiseksi menettäen oleellisesti puristuslujuuttaan. Tästä syystä korkeilla lujuusluokilla ja alle 50 vuoden käyttöiälle suunniteltuja rakenteita valmistetaan lisähuokostamattomana.

Tutkimuksessa tarkasteltiin eri puolella Suomea sijaitsevien tuulivoimaloiden (9 kpl) lisähuokostamattomien teräsbetoniperustusten käyttöikä eri käyttöikämallilla. Kerroinmenetelmällä betonirakenteen käyttöikä vaihteli välillä 37-78 vuotta ja lujuuden häviämisen mallilla välillä 36-47 vuotta. Rakenteen tavoiteikä on 30 vuotta.

1. Johdanto

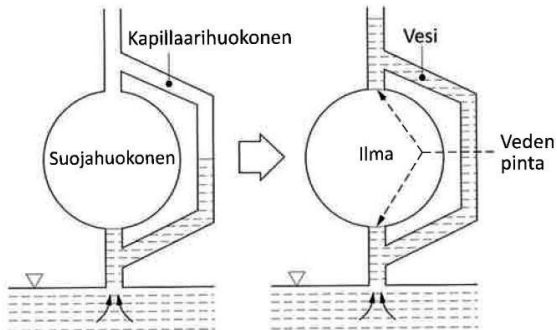
1.1 Yleistä

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa betonin pakkasenkestävyyttä on pyritty parantamaan lisähuokostuksella. Suomessa lisähuokostimien käyttö yleistyi 1980-luvulla. Tästä huolimatta lisähuokostamattomia rakenteita tai rakenteita, joissa lisähuokostus on epäonnistunut, on rakennettu myös tämän jälkeen. Vuosien 2017 ja 2018 aikana Suomessa oli ns. betonikriisi, joka johtui liiallisesta huokostimien käytöstä. Tämän seurauksena betoni muodostuu liian huokoiseksi menettäen oleellisesti puristuslujuuttaan. Tästä syystä korkeilla lujuusluokilla ja alle 50 vuoden käyttöiälle suunniteltuja rakenteita valmistetaan lisähuokostamattomana.

Tutkimuksessa tarkasteltiin kriittisesti nykyisin Suomessa ja maailmalla käytössä olevien betonirakenteiden käyttöikämallien (4 kpl) toimintaa ja soveltuvuutta Suomessa käytettyihin betonilaatuihin. Tutkimusdatana käytettiin eri puolella Suomea sijaitsevien tuulivoimaloiden (9 kpl) betoniperustusten reseptejä. Käytössä olleen tutkimusdatan avulla laskennallista tarkastelua voitiin suorittaa kahden eri mallin avulla. Kahden muun mallin toimintaa ja soveltuvuutta tarkasteltiin ainoastaan teoreettisella tasolla.

1.2 Betonin pakkasrapautuminen ja pakkasrapautumisen mallintaminen

Betonin pakkasrapautuminen on seurausta betonin huokosverkostossa olevan veden jäätyminen aiheuttamasta paineesta. Vapaan veden jäätyessä sen tilavuus kasvaa n. 9 %. Jäätyneen veden jälkeen lämpötilan taas noustessa paine kasvaa edelleen jääkiteiden tilavuuden kasvaessa. Kaikki huokosverkoston vesi ei kuitenkaan jäädy lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n, vaan huokosverkostossa olevan veden jäätympiste alenee huokosten koon pienessä. [1] Jotta betoni olisi pakkasenkestävää, on siinä oltava riittävä määrä tasaisesti jakautuneita ilmahuokosia, jotka eivät täyty kapillaarivoimien vaikutuksesta, vaan joihin vesi voi jäätyessään tunkeutua (kuva 1). Tämä riittävien suojahuokosten määrä voidaan varmistaa ainoastaan käyttämällä betonin lisähuokostusta [1].



Kuva 1. Betonin suojahuukokset eivät täyty kapillaarivoimien vaikutuksesta, vaan täyttyvät vasta veden jäätyessä [2]

Pakkasrapautumisilmiötä huokoisissa materiaaleissa on kuvattu maailmalla yli 15 erilaisella teorialla tai mallilla [3]. Ehkä laajimmin maailmalla käytetyistä malleista on hydraulisen paineen teoria, joka on kehitetty alun perin jo vuonna 1949. Mallia on päivitetty myöhemmin useaan otteeseen [1]. Muita käytettyjä malleja ovat mm:

- Kerroinmenetelmä [4],
- FIB 34 – käyttöikämalli [5],
- Kriittisen kosteuspitoisuuden malli, [6]
- Lujuuden häviämisen malli [7],
- Hydrostaattisen paineen malli [8, 9].

2. Käyttöiän laskenta

2.1 Tutkimusdata ja menetelmät

Tutkimusdatana käytettiin eri puolella Suomea sijaitsevien tuulivoimaloiden (9 kpl) betoniperustusten reseptejä. Laskennassa käytetyt lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt lähtötiedot.

Perustus	Sijainti	Betonilaatu	Rasitusluokka	Suunnittelu-käyttöikä	v/s suhde	Ilmamäärä %
1	Coast	C45/55	XF3	50	0.39	2
2	Central Finland	C55/67	XF3	50	0.34	2
3	Coast	C55/67	XF3	50	0.38	2
4	Northern Finland	C50/60	XF3	50	0.40	2
5	Coast	C55/67	XF3	50	0.41	2
6	Central Finland	C55/67	XF3	50	0.38	2
7	Central Finland	C50/60	XF3	50	0.38	2
8	Central Finland	C55/67	XF3	50	0.38	2
9	Central Finland	C55/67	XF3	50	0.38	2

Käytössä olleen tutkimusdatan avulla laskennallista tarkastelua voitiin suorittaa kerroinmenetelmän sekä lujuuden häviämisen mallin avulla. Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi FIB 34 – käyttöikämallin sekä hydrostaattisen paineen mallin toimintaa ja soveltuvuutta tarkasteltiin teoreettisella tasolla.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Kerroinmenetelmä

Kerroinmenetelmällä lasketut betonirakenteen käyttöiät on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Betoniperustusten laskennalliset käyttöiät kerroinmenetelmällä.

Perustus	Kerroin										
	t_{LR}	A	B	C	D	E1	E2	E3	F	G	t_L
1	50	1.40	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.0	-	0.7	43
2	50	2.32	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.1	-	0.7	78
3	50	1.52	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.0	-	0.7	46
4	50	1.30	1.3	1.0	-	0.67	1.2	1.0	-	0.7	48
5	50	1.22	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.0	-	0.7	37
6	50	1.52	1.3	1.0	-	0.67	1.1	1.0	-	0.7	51
7	50	1.52	1.3	1.0	-	0.67	1.1	1.0	-	0.7	51
8	50	1.52	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.1	-	0.7	51
9	50	1.52	1.3	1.0	-	0.67	1.0	1.1	-	0.7	51

Kertoimien selitykset:

- t_{LR} : Vertailukäyttöikä vuosina
- B: Massiivinen rakenne, ei pinnoitusta
- C: Jälkihoito by 65:n mukaan
- D: Ulkona sijaitseva rakenne
- E1: Rasitusluokka
- E2: Ilmansuunta
- E3: Maantieteellinen sijainti
- F: Käyttörasitus
- G: Ei huoltoa
- t_L : Laskennallinen käyttöikä vuosina

Yksi tärkeimpiä tekijöitä kerroinmenetelmällä laskettaessa on betonin ilmamäärä. Jo prosentin muutoksella betonin ilmamäärään sen käyttöikä saattoi nousta jopa kymmenillä vuosilla. Tällöin riittävällä ilmamäärällä betonirakenteesta saataisiin laskennallisesti kokonaan rapautumatonta, mikä ei käytännössä ole kuitenkaan mahdollista.

Yksi mielenkiintoinen tekijä laskennassa on kerroin G (tarkastus- ja huoltoväli), jolle voidaan asettaa arvoksi 0,7 tai 1. Kertoimella on käytännössä 30 prosentin vaikutus rakenteen käyttöikään, mutta betonirakenteen tarkastus ei muuta betonin huokosrakennetta ja siten lisää sen pakkaskestävyyttä. Tällöin turvallisella puolella on käyttää arvoa 0,7. Tässä tutkimuksessa rakenteet sijaitsevat osin maan alla, jolloin niitä ei voida säännöllisesti huoltaa tai tarkastaa.

3.2 Lujuuden häviämisen malli

Lujuuden häviämisen mallilla lasketut betonirakenteen käyttöiät on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Betoniperustusten laskennalliset käyttöiät lujuuden häviämisen mallilla.

Perustus	Kerroin				
	B	N	k	M	t_L
1	12	400	1.5	26	123
2	12	400	1.5	27	119
3	12	400	1.5	26	123
4	12	400	1.5	20	160
5	12	400	1.5	26	123
6	12	400	1.5	27	119
7	12	400	1.5	27	119
8	12	400	1.5	27	119
9	12	400	1.5	27	119

Kertoimien selitykset:

- B: Jäätymis-sulamiskokeen kerroin, vakio
 N: Jäätymis-sulamissyklien määrä, jonka betoni kestää
 k: Varmuuskerroin, vakio
 M: Vuosittaisten jäätymis-sulamissyklien määrä
 t_L : Laskennallinen käyttöikä vuosina

Määrittävimpänä tekijänä voidaan pitää vuosittaisten jäätymis-sulamissyklien määrää kuvaavaa kerrointa M. Vuosittaisten jäätymis-sulamissyklien määrään vaikuttaa rakenteen maantieteellinen sijainti ja Suomessa eri sijainnilla voi olla n. 25 % ero kertoimen arvoon. Kerroin N kuvaa jäätymis-sulamissyklien määrää, jonka betonirakenteen arvioidaan kestävän ennen kuin se lasketaan rapautuneeksi. Kertoimen N ylärajana esitetään mallissa arvoa 400, mutta tutkimusdatana käytettyjen betonilaatujen lujuus oli niin korkea, että N sai kaikissa esimerkkitaapauksissa maksimiarvon 400.

Betonirakenteen sijaintiin ei voida käytännössä vaikuttaa, jolloin ainoa betonirakenteen laskennallista käyttöikää määrittävä tekijä on lujuusluokan kautta saatava kerroin N. Huomattavaa kuitenkin on, että betonilaadusta ei voida suoraan päätellä esimerkiksi betonin ilmamäärää ja mallia tuleekin soveltaa varauksella lisähuokostamattomiin betonirakenteisiin.

Mallia käytettäessä on otettava huomioon lisäksi kerroin B, joka kuvaa laboratoriossa suoritettua jäätymis-sulamiskokeen suhdetta todelliseen jäätymis-sulamisasiin. Koe on suoritettu tilanteessa, missä betoniin vaikuttaa jäätymisen ja sulamisen lisäksi sulfaattirasitus. Sulfaattirasitus kiihdyttää betonin vaurioitumista, jolloin kertoimena voisi olla mahdollista käyttää suurempaakin arvoa tilanteessa, jossa sulfaattirasitus voidaan varmasti sulkea pois. Tämän tutkimuksen esimerkkirakenteissa tämä on kuitenkin mahdollista.

3.3 Tulosten vertailu

Eri käyttöikämallilla lasketut betonin käyttöiät on yhdistetty taulukkoon 5, missä on esitetty betoniperustuksista saatujen laskennallisten käyttöiäiden erot eri malleilla. Taulukossa on esitetty lujuuden häviämisen mallille kaksi eri käyttöikää. Toinen käyttöikä on saatu käyttämällä vuosittaisten jäätymis-sulamissykliä määrässä ne kerrat, kun lämpötila on laskenut alle 0 °C:n. Toinen luku on laskettu tilanteessa, jossa jäätymis-sulamissykliksi on käytetty tilannetta, jossa betonin huokosvesi jäätyy (-5 °C).

Taulukko 4. Erot eri käyttöikämallilla saatujen betonin laskennallisten käyttöikien välillä

Perustus	Käyttöikämalli			Ero verrattuna kerroinmenetelmään	
	Kerroinmenetelmä	Lujuuden häviämisen malli		Jäätymis-sulamissyklit 0 °C	Jäätymis-sulamissyklit -5 °C
		Jäätymis-sulamissyklit 0 °C	Jäätymis-sulamissyklit -5 °C		
t_L	t_L	t_L	0 °C	-5 °C	
1	43	36	123	-7	80
2	78	36	119	-42	41
3	46	36	123	-7	77
4	48	47	160	-1	112
5	37	36	123	-1	86
6	51	36	119	-15	68
7	51	36	119	-15	68
8	51	36	119	-15	68
9	51	36	119	-15	68

Eri käyttöikämallit lähestyvät betonin käyttöiän laskentaa hieman eri tavalla ja laskennan lähtötiedoksi tarvitaan eri muuttujia. Kaikki tässä tutkimuksessa käytetyt käyttöikämallit ottavat huomioon jäätymis-sulamissykliin määrän joko suoraan tai epäsuorasti. Muut muuttujat laskennan suorittamiseksi vaihtelevat melko paljon. Eri käyttöikämallien vaatimat lähtötiedot on esitetty kootusti taulukossa 6.

Taulukko 5. Eri käyttöikämallien vaatimat lähtötiedot laskennan suorittamiseksi

Käyttöikämalli	Huomioon otettavat asiat					
	Betoni-laatu	v/s suhde	Ilmamäärä %	Jäätymis-sulamissyklit	Rasitus-luokka	Erillisten laboratoriotestien tarve
Kerroinmenetelmä		x	x	(x)*	x	
Lujuuden häviämisen malli	x			x		
FIB 34 - käyttöikämalli	x			(x)*	x	x
Hydrostaattisen paineen malli				x		x

*huomioitu epäsuorasti

4. Päätelmät

Käytössä olevien lähtötietojen avulla käyttöikä saatiin laskettua kerroinmenetelmällä sekä lujuuden häviämisen mallilla. Toiset kaksi tarkastelun kohteena ollutta mallia tarvitsisivat erillisiä laboratorionäytteitä, jolloin niiden avulla laskentaa ei voitu suorittaa. Tavoitteena ei ollut asettaa eri malleja paremmuusjärjestykseen. Joka tapauksessa kerroinmenetelmä on käyttökelpoinen Suomessa sijaitsevien betonirakenteiden käyttöiän laskentaan sen verrattain helpon laskennan sekä helposti saatavilla olevien lähtötietojen saatavuuden takia. Lujuuden häviämisen malli on myös verrattain helppokäyttöinen, mutta siihen tulee varsinkin Suomessa suhtautua varauksella, sillä sen laadinnassa on käytetty eri betonilaatua kuin mitä Suomessa käytetään.

Kerroinmenetelmällä ja lujuuden häviämisen mallilla lasketut betonirakenteiden käyttöiät olivat lähellä toisiaan tilanteessa, jossa jäätymis-sulamissyklinä käytetään ilman jäähtymistä alle 0°C:n.

Tässä on otettava huomioon, että nykytiedon mukaan betonin huokosverkoston vesi jäätyy vasta ilman jäähtyessä alle $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n.

Ulkoilmassa sijaitsevan (jäätyvän) betonirakenteen tärkeimmäksi käyttöikää määritteleväksi tekijäksi tunnistettiin tuoreen betonimassan ilmamäärä. Käyttöiän laskennassa huomattiin, että jo $1\text{ }\%$:n muutos betonin ilmamäärässä lisäsi betonirakenteen laskennallista käyttöikää jopa kymmenillä vuosilla. Yksi epärelevantimmista kertoimista oli puolestaan kerroinmenetelmässä esitetty tarkastus- ja huoltoväli, sillä betonin huokosrakennetta ei voida jälkikäteen muuttaa tarkastus-/huoltokäyntien yhteydessä. Lisäksi osa ulkoilmassa sijaitsevista betonirakenteista saattaa sijaita siten, ettei niiden huolto ole mahdollista (esimerkiksi maanalaiset tai pysyvästi peitetyt betonirakenteet).

Betonin pakkasrapautumisesta ja varsinkin sen etenemisestä tiedetään vielä melko vähän. Tämän tutkimuksen johtopäätöksenä tunnistettiin tarve kehittää uusi tai parantaa nykyisiä käyttöiän laskentaan tarkoitettuja malleja varsinkin pakkasrapautumisen etenemisen mallintamiseen. Tavoiteltavaa olisi luoda käyttöikämalli, jonka avulla betonin pakkasrapautumisen kautta voitaisi johtaa raja-arvot eri korjaustavoille. Esimerkiksi betonirakenteen kuntotutkimuksen yhteydessä saatavien laboratoriotulosten pohjalta tulisi voida ennustaa, montako vuotta rakenteella on aikaa olla korjattavissa pinnoitus-paikkauskorjauksella ja kuinka monen vuoden jälkeen on käytettävä raskaampia korjausmenetelmiä. Samantyyppinen malli on jo kehitetty betonirakenteen raudoitusterästen korroosion etenemiselle.

Lähdeluettelo

- [1] Pigeon, M. ja Pleau, R. 1995. Durability of concrete in cold climates. Suffolk. E & FN Spon. 244 s.
- [2] by 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus. 2019. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 136 s.
- [3] Kuosa, H. ja Vesikari, E. 2000. Betonin pakkaskestävyyden varmistaminen Osa 1: perusteet ja käyttöikäsuunnittelu. VTT Technical Research Centre of Finland. Research notes 2056. 141 s.
- [4] by 50 Betoninormit. 2012. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 251 s.
- [5] Schiessl, P., Bamforth, P., Baroghel-Bouny, V., Corley, G., Faber, M., Forbes, J., Gehlen, C., Helene, P., Helland, S., Ishida, T., Markeset, G., Nilsson, L., Rostam, S., Siemes, A. ja Walraven, J. 2006. Model Code for Service Life Design. International Federation for Structural Concrete (fib). 116 s.
- [6] Fagerlund, G. 1977. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Tentative RILEM recommendation. Prepared on behalf of RILEM Committee 4 CDC. Materiaux et Constructions. Vol. 58. sivut 217- 229.
- [7] Li, G., Wang, D. ja Du, J. 2016. Deterioration and Service Life Prediction of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles in *NNNN2SSSS4* Solution. American Journal of Civil Engineering Vol. 4. issue 3. sivut 104-110.
- [8] Yu, H., Ma, H. ja Yan, K. 2017. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life. Construction and building materials. Vol. 137. sivut 104-116.
- [9] Finnish Standard Association. 1988. Concrete. Durability. Freeze-thaw resistance. Finland. SFS 5447. 318 s.

A2. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus

Massiivibetonirakenteiden rakennuskosteudenhallinta ja toiminnan varmistaminen suunnitteluvaiheessa

Teemu Vanha-Viitakoski ja Topi Moisio
Sweco Rakennetekniikka Oy

Tiivistelmä

Artikkelissa tarkastellaan talonrakennushankkeissa käytettävien yli metrin paksuisten massiivibetonirakenteiden toimintaa rakennuskosteudenhallinnan näkökulmasta. Tutkimuksessa esitetään erään hybridirakennushankkeen kerrokselliselle välipohjarakenteelle toteutettujen laskennallisten tarkastelujen tuloksia. Tutkimuksen avulla saatiin selville reunaehdot siirtolaattarakenteen tuulettamiseksi esimerkkitilanteessa. Tuuletusmäärät ja jakotapa varmistettiin lisäksi erillisellä selvityksellä virtauslaskennan keinoin. Näin voitiin varmistaa, että rakenteeseen jäänyt suuri kosteusmäärä saadaan hallitusti poistettua, eikä kosteuden nousu täyttökerroksissa tai pintakerroksissa muodostu kriittisen korkeaksi. Tutkimuksen avulla saatiin hyödyllistä tietoa eri muuttujien vaikuttavuudesta kriittisten rakenneosien kosteuteen.

1. Johdanto

Talonrakentamisessa tulee enenevässä määrin vastaan tilanteita, joissa rakenteen kantavuus edellyttää massiivisia, yli metrin paksuisia paikallavalettuja betonirakenteita. Tällaisia rakenteita ovat erityisesti raskaasti kuormitetut ala- ja välipohjarakenteet sekä erityyppiset kuormansiirtorakenteet. Esimerkiksi hybridirakennushankkeissa, joissa runkojärjestelmä vaihtuu ylöspäin mentäessä kauppakeskuksen pitkien jänneväliden pilari-laatta -järjestelmästä asuinrakennuksen rungon kantavat seinät -runkojärjestelmään, on usein välttämätöntä siirtää suuriakin pystykuormia välipohjarakenteilla alemmalle rungolle. Kuormat siirretään usein massiivisella teräsbetonisella siirtolaattarakenteella, joiden paksuus on tyypillisesti noin 1–2 metrin luokkaa.

Kyseisen kaltaisten massiivibetonirakenteiden kosteudenhallintatoimenpiteet vaihtelevat tapauskohtaisesti, eikä vakiintunutta toteutustapaa kokonaisuuden hallitsemiseksi ole muodostunut. Tarkoituksenmukaisen ratkaisun valintaan vaikuttavat mm. rakennuksen käyttötarkoitus, pinnoitevalinnat, aikataulu, rakennepaksuudet sekä massiivibetonirakenteeseen liittyvät rakenteet. Yksinkertaistettuna vaihtoehtoja on kolme: rakenteiden kuivumisen odottaminen, rakenteen päälle tyypillisesti toteutetun täyttökerroksen tuulettaminen koneellisesti tai kosteudensiirtymisen sulkeminen runkobetonilaatan yläpinnasta kosteussulkukäsittelyllä.

Rakennepaksuuden ollessa reilusti yli puoli metriä ei kerroksellisen rakenteen runkobetonin kuivumisen odottaminen ole useinkaan rakentamisaikataulujen puitteissa mahdollista, jolloin kosteutta voidaan hallita esimerkiksi koneellisen tuuletuksen avulla. Koneellisen tuuletuksen tarve ja toteutustavat vaihtelevat, eikä niille ole laadittu yleistä ohjeistusta. Tutkimuksessa käsitellyn case-kohteen yli metrin paksuisen pitkään säälle alttiin ja laaja-alaisen massiivibetonirakenteen kosteusriskit ovat esimerkiksi tavanomaista väestönsuojan kattorakennetta korkeammat. Nähtiin tarve analysoida rakenteen toimintaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä laskennallisesti, jotta pystyttiin valitsemaan kohteeseen riittävät ja soveltuvimmat keinot kosteuden hallitsemiseksi.

2. Kerroksellisen massiivibetonirakenteen kosteusteknisen toiminnan arviointi laskennallisesti

Laskentatarkastelujen tarkoitus oli vertailla eri rakennevaihtoehtojen kosteusteknistä toimivuutta. Laskentatarkastelujen tavoitteena oli määrittää välipohjarakenteen täyttökerroksen tarkoituksenmukaiset ilmanvaihdon reunaehdot, joilla rakenne on rakennusfysikaalisesti toimiva ja turvallinen.

Rakenteen kosteusteknistä toimintaa mallinnettiin WUFI Pro-ohjelmalla vakio-olosuhteissa yksidimensionaalisenä dynaamisena simulointina. Täyttökerroksen olosuhteita arvioitiin suhteellisen kosteuden perusteella ja suomalaisen homeindeksin avulla [1]. Laskentatarkastelujen kesto vaihteli 2–10 vuoden välillä.

2.1 Materiaaliominaisuudet

Laskentatarkasteluissa käytettiin WUFI:n materiaalikirjaston materiaaliominaisuuksia, joita muokattiin RIL 255-1-2014 -kirjassa [2] ja FRAME -tutkimuksen loppuraportissa [3] esitettyjä vastaaviksi. Betonin materiaaliominaisuuksilla suoritettiin herkkyystarkasteluja, joissa hyödynnettiin Betoniyhdistyksen BY 2020 -laskentaohjelmalla saatuja tarkennettuja tietoja betonin kuivumisen osalta. Kalvomaiset materiaalit mallinnettiin 1 mm paksuisina. Kerrospaksuuden muutos huomioitiin materiaaliominaisuuksissa.

2.2 Olosuhteet

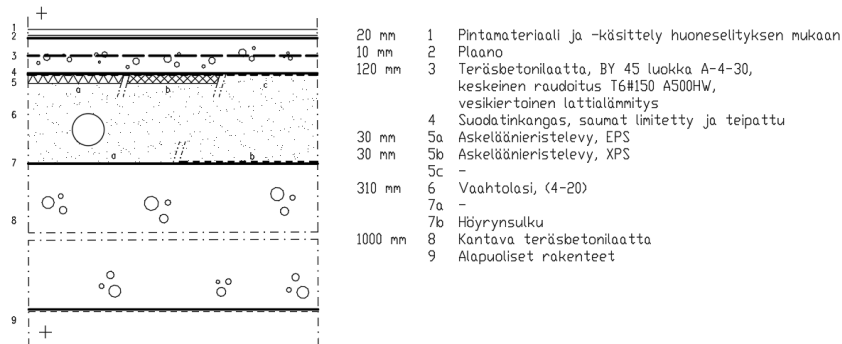
Laskentatarkasteluissa rakenteen molemmille puolille määritettiin lämmin sisäilma. Sisäilman lämpötilaksi oletettiin 20 °C. Sisäilman suhteelliseksi kosteudeksi oletettiin laskentatarkastelusta riippuen 60 % RH (normaali sisäilma) tai 30 % RH (koneellisesti kuivattu sisäilma). Täyttökerroksen tuuletusilman olosuhteina käytettiin edellä esitettyjä rakenteen yläpuolisen sisäilman olosuhteita laskentaohjelman rajoituksista johtuen. Koneellisesti kuivatun sisäilman rakenteen yläpintaa kuivattava vaikutus poistettiin laskentatarkasteluista käyttämällä lattian pinnassa tiivistä materiaalia.

2.3 Tarkasteltava rakenne

Laskentatarkasteluissa tutkittiin kerroksellista välipohjan siirtolaattarakennetta, jonka massiivibetonilaatan paksuus oli 1000 mm ja pintalaatan paksuus 120 mm. Massiivibetonilaatan ja pintalaatan välisen täyttökerroksen materiaali oli vaahtolasimursketta. Vaahtolasimurskekerroksessa oli tuuletuskanavisto, johon pystyttiin tarvittaessa kytkemään ilmakehän ilmakehän. Tarkasteltavan massiivibetonirakenteen rakennetyyppi on esitetty kuvassa 1.

Laskentatarkasteluissa 310 mm paksu vaahtolasimurskekerros mallinnettiin 100 mm paksuna tuuletettuna ilmapölynä, jolloin ilman määrä vastasi tiiviin vaahtolasimurskekerroksen huokosissa olevan ilman määrää. Vaahtolasimurskeen asennus oletettiin kuivaksi. Vaahtolasikerroksen huokosilman kosteuskapasiteettia ei huomioitu, mikä lisäsi tarkastelun varmuutta.

Rakentamistavasta johtuen rakenteen kastumisaika oli pitkä, minkä takia tarkasteluissa käytettiin korkeita lähtökosteuksia. Rakenteesta oletettiin poistuneen vain kapillaarisesti sitoutunut kosteus, mikä lisäsi tarkastelujen varmuutta. Betonin hydrataation vaikutusta ei huomioitu tarkasteluissa rakennuskosteutta vähentävänä tekijänä.



Kuva 1. Tarkasteltavan rakenteen rakennetyyppi.

Laskentatarkasteluilla selvitettiin seuraavien variaatioiden vaikutusta rakenteen toimintaan:

- Askeläänieristekerros (rakennekerros 5)
 - a EPS
 - b XPS
 - c ei eristettä
- Höyrynsulku siirtolaatan yläpinnassa (rakennekerros 7)
 - a Ei höyrynsulkua
 - b Höyrynsulku ($s_d = 100$ m, $s_d = 7,5$ m tai $s_d = 2,0$ m)
- Täyttökerroksen tuuletus
 - a Tuuletusmäärä (1, 2, 3 tai 4 [1/h])
 - b Tuuletuksen kesto (1, 2 tai 3 vuotta)

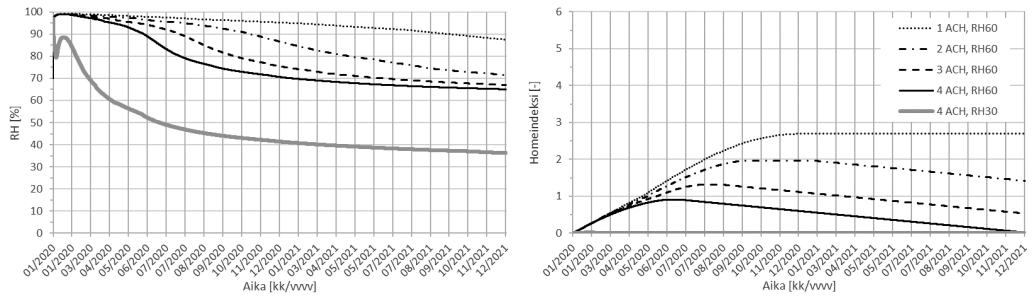
Laskentatarkastelujen perustapauksessa askeläänieristeenä oli EPS-eriste ja siirtolaatan yläpinnassa ei ollut höyrynsulkua. Askeläänieristekerroksen vaikutusta rakenteen toimintaan tarkasteltiin EPS-eristettä tiiviimmällä XPS-eristeellä sekä ilman askeläänieristettä. Siirtolaatan yläpinnan höyrynsulun vaikutusta rakenteen toimintaan tarkasteltiin kolmella höyrytiivyydeltään erilaisella höyrynsulkumateriaalilla: 2-komponenttinen epoksihöyrynsulku, 1-komponenttihöyrynsulku ja vesihöyryä läpäisevämpi kosteussulku. Täyttökerroksen tuuletuksen vaikutusta tutkittiin rakenteen perustapauksella.

Rakenteen kriittiset tarkastelupisteet olivat askeläänieristekerroksen tai pintalaatan alapinta ja siirtolaatan ylä-/alapinta. Tarkasteltavan rakenteen materiaaleille valittiin niitä vastaavat homehtumisherkkyyssuokat. Täyttökerroksen ja sitä ympäröivien materiaalien homehtumisherkkyyssuokkana käytettiin luokkaa *HHL3* (kohtalaisen kestävä). [1]

3. Laskentatulokset

3.1 Täyttökerroksen tuuletus

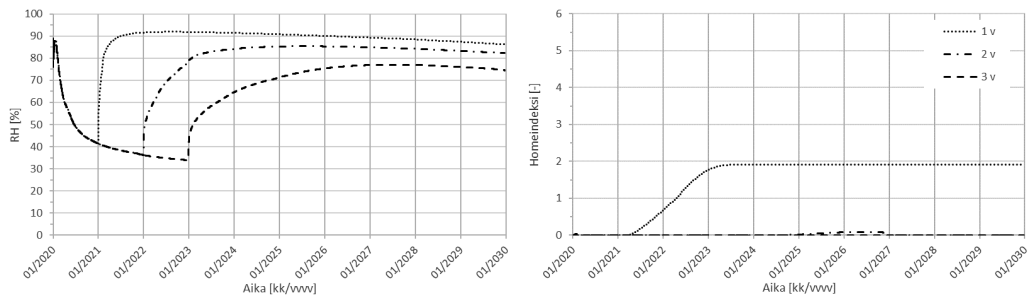
Täyttökerroksen tuuletuksen vaikutusta tutkittiin rakenteen perustapauksella. Rakenteen toimintaa tarkasteltiin tuuletusilman kosteudella 60 % RH, kun täyttökerroksen ilmanvaihtuvuutena käytettiin 1, 2, 3 ja 4 1/h. Lisäksi rakenteen toimintaa tarkasteltiin tuuletusilman kosteudella 30 % RH ja ilmanvaihtuvuudella 4 1/h. Kuvassa 2 on esitetty täyttökerroksen tuuletuksen vaikutus EPS-eristeen alapinnan suhteelliseen kosteuteen ja homeindeksiin.



Kuva 2. EPS-eristeen alapinnan suhteellinen kosteus (vasemmalla) ja homeindeksi (oikealla). Laskentatulokset ilmanvaihtuvuoksilla [1/h] 1 (pisteviiva), 2 (pistekatkoviiva), 3 (katkoviiva) ja 4 (ehjä viiva), kun tuuletusilman kosteus on 60 % RH (mustalla). Laskentatulokset ilmanvaihtuvuudella 4, kun tuuletusilman kosteus oli 30 % RH (harmaalla).

Kuivatulla tuuletusilmalla EPS-eristeen alapinnan suhteellinen kosteus on merkittävästi matalampi heti laskennan alkuvaiheesta lähtien. Kuivatulla tuuletusilmalla 70 % suhteellinen kosteus saavutettiin n. kahdessa kuukaudessa. Kostealla tuuletusilmalla kahden vuoden tarkastelujakson aikana 70 % suhteellinen kosteus saavutettiin vain ilmanvaihtuvuoksilla 3 ja 4 1/h. Kostealla tuuletusilmalla homeindeksin maksimiarvo jäi alle 1,0 vain ilmanvaihtuvuudella 4 1/h. Kuivatulla tuuletusilmalla homeindeksi pysyi lähes nollassa koko tarkastelun ajan.

Käyttäjän vaikutusta rakenteen toimintaan tarkasteltiin ilmanvaihdon voimakkuudella 4 1/h ja tuuletusilman kosteudella 30 % RH. Tarkasteluissa tuuletus pysäytettiin yhden, kahden tai kolmen vuoden käytön jälkeen. Tuuletuksen käyttäjän vaikutus EPS-eristeen alapinnan suhteelliseen kosteuteen ja homeindeksiin on esitetty kuvassa 3.

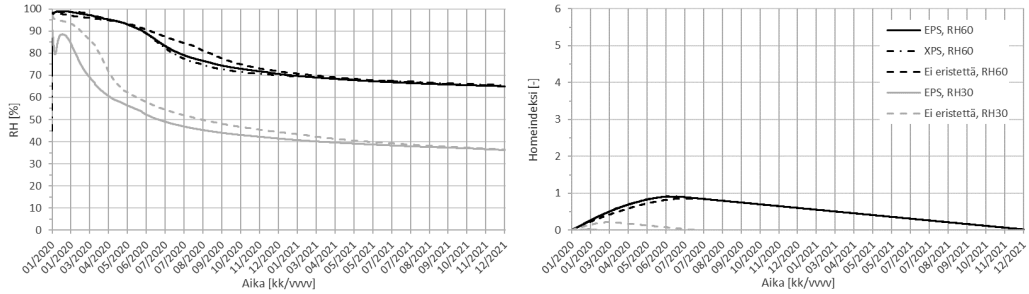


Kuva 3. EPS-eristeen alapinnan suhteellinen kosteus (vasemmalla) ja homeindeksi (oikealla). Laskentatulokset, kun ilmanvaihto on katkaistu yhden vuoden jälkeen (pisteviiva), kahden vuoden jälkeen (pistekatkoviiva) ja 3 vuoden jälkeen (katkoviiva). Tuuletusilman kosteus 30 % RH.

Suhteellinen kosteus EPS-eristeen alapinnassa laski alle 50 %:iin puolen vuoden kuluessa tarkastelun aloituksesta. Kun ilmanvaihto pysäytettiin vuoden kohdalla, suhteellinen kosteus nousi nopeasti yli 90 %:iin, minkä jälkeen suhteellinen kosteus alkoi hitaasti laskea. Vastaavasti kahden vuoden tuuletuksen jälkeen, suhteellinen kosteus nousi noin 85 %:iin, mutta muutos tapahtui huomattavasti hitaammin, kuin yhden vuoden tuuletuksella. Kolmen vuoden tuuletuksella suhteellinen kosteus jäi alle 80 %:iin tuuletuksen pysäyttämisen jälkeen. EPS-eristeen alapinnan homeindeksi nousi yhden vuoden tuuletuksella pitkäaikaisesti maksimiarvoon 1,9. Yli kahden vuoden tuuletuksella rakenteen homeindeksi ei noussut merkittävästi nollassa.

3.2 Pintalaatan alapuolinen eristekerros

Pintalaatan alapuolisen eristekerroksen tiiveys vaikuttaa kosteuden siirtymiseen pintalaatan ja täyttökerroksen välillä. Kuvassa 4 on esitetty eristekerroksen tai pintalaatan alapinnan (kun pintalaatan alapuolella ei eristettä) suhteellinen kosteus ja homeindeksi.

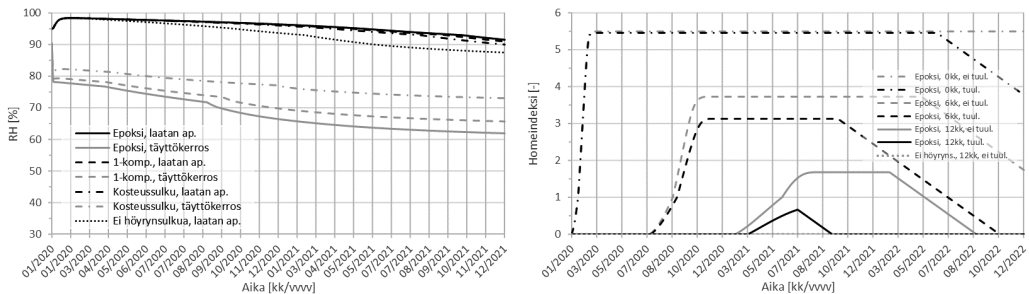


Kuva 4. Eristekerroksen/pintalaatan alapinnan suhteellinen kosteus (vasemmalla) ja homeindeksi (oikealla). Laskentatulokset tuuletusilman kosteudella 60 % RH (mustalla) ja kosteudella 30 % RH (harmaalla). EPS-eriste (ehjä viiva), XPS-eriste (pistekatkoviiva) tai ilman eristettä (katkoviiva) Täyttökerroksen ilmanvaihtuvuus 4 [1/h].

Laskentatuloksissa ei ollut merkittäviä eroja eristemateriaalien välillä. Eristeetön rakenne toimii hieman eristeellistä rakennetta heikommin tarkasteltaessa täyttökerroksen toimintaa.

3.3 Siirtolaatan yläpinnan höyrinsulku

Höyrinsulku hidastaa siirtolaatan kosteuden siirtymistä täyttökerrokseen, jolloin betonin rakennuskosteus tulee poistua rakenteesta lähes täysin alapuolisiin tiloihin. Siirtolaatan yläpinnan höyrinsulun vaikutusta rakenteen toimintaan tarkasteltiin kolmella vesihöyrytiivyydeltään erilaisella höyrinsulkumateriaalilla. Huomioitavaa kuitenkin on, että korkea alustan kosteus todellisuudessa rajoittaa monien 1-komponenttisten höyrinsulkujen käyttöä. Lisäksi tarkastelujen yhteydessä tutkittiin, miten kosteuden siirtyminen betonilaatan alapinnasta vaikuttaa mahdollisen alakattorakenteen homehtumisriskiin. Höyrinsululliset rakenteet tuuletettiin sisäilmalla (60 % RH, 1 1/h) ja höyrinsulun rakenne tuuletettiin kuivatulla ilmalla (30 % RH, 4 1/h). Kuvassa 5 on esitetty siirtolaatan alapinnan suhteellinen kosteus ja alakattorakenteen yläpinnan homeindeksi. Alakaton homehtumisherkkyysluokkana käytettiin *HHL1* (hyvin herkkä) [1].



Kuva 5. Vasemmalla suhteellinen kosteus siirtolaatan alapinnassa 30 mm syvyydellä (mustat viivat) ja täyttökerroksessa (harmaat viivat) eri höyrinsulkuvaihtoehtojilla, epoksi (ehjä viiva), 1-komponentti (katkoviiva) ja kosteussulku (pisteviiva). Höyrinsuluton rakenne (pisteviiva). Oikealla alakattorakenteen homeindeksi eri asennusajankohtina (0 kk, 6 kk, 12 kk).

Kuvasta 5 nähdään, että höyrinsulkujen tiiveyden vaikutus betonin alapinnan kosteuteen on vähäinen ja erot ovat pieniä. Ilman höyrinsulkua betonin kosteus on kuitenkin lopussa noin 87 % RH ja 5 % RH höyrinsulullisia rakenteita pienempi. Kaikki höyrinsulkukäsittelyt hidastavat kosteuden siirtymistä täyttökerrokseen melko tehokkaasti ja kosteus pysyy kaikilla vaihtoehdoilla lähes tarkastelujakson alusta alkaen alle 80 % RH. Epoksihöyrinsulullisessa rakenteessa täyttökerroksen kosteus on kuitenkin selvästi muita vaihtoehtoja matalampi. Eroa on noin 5–12 % RH tarkastelun puolivälistä eteenpäin. Täyttökerroksen kosteus vastaavalla tuuletuksella ilman höyrinsulkua on selvästi korkeampi ja pysyy lähes 90 % RH tarkastelun loppuun asti (kuva 2).

Alakattorakenteen toimintaa tutkittiin tuulettamalla ja tuulettamattomalla 200 mm korkealla alakattotilalla. Tuulettun alakattotilan ilmanvaihtuvuutena käytettiin 0,1 l/h. Tarkasteluissa oletettiin, että alakatto asennetaan 0 kk, 6 kk tai 12 kk kuluttua laskentatarkastelun aloituksesta. Alakaton tarkasteluissa käytettiin epoksihöyrinsulkua ja lisäksi tehtiin vertailulaskelma höyrinsuluttomalla rakenteella (harmaa pisteiviiva).

Kuvassa 5 (oikealla) tuulettun alakaton laskentatulokset on esitetty mustalla ja tuulettamattoman alakaton harmaalla. Kun alakatto asennettiin heti tarkastelun alussa, homeindeksi nousi pitkäaikaisesti yli arvon 5,0. 6 kk kuluttua asennettun alakaton homeindeksi nousi tuulettamattomana sekä tuulettettuna yli arvon 3,0. Kun alakatto asennettiin 12 kk kuluttua laskennan aloituksesta, tuulettamattoman alakattorakenteen homeindeksi nousi arvoon 1,7, mutta tuulettun alakattorakenteen homeindeksi pysyi alle arvon 1,0. Höyrinsuluttomassa rakenteessa homeindeksi ei noussut nolasta, kun alakatto asennettiin 12 kk laskennan aloituksesta.

4. Yhteenveto

Suoritettujen laskentatarkastelujen perusteella kohteen kerroksellisen massiivibetonirakenteen täyttökerroksen tuuletukselle lähdettiin tavoittelemaan ilmanvaihtokerrointa 4 l/h huokostilavuutta kohden. Tuuletusilma suositeltiin kuivattavaksi 30 % suhteelliseen kosteuteen ja ilmanvaihdon käyttäjäksi suositeltiin kolmea vuotta. Tuulettava rakenne oli pinta-alaltaan suuri sekä geometrialtaan haastava, joten suunnitellun ilmanvaihtotavan toimivuus varmistettiin virtauslaskennan avulla.

Työmaalla rakenteeseen asennettiin jatkuvatoiminen täyttökerroksen olosuhdeseuranta kosteuden poistumisen varmistamiseksi. Työmaalta saatavia seurantamittauksia tullaan hyödyntämään tulevissa massiivibetonirakenteiden suunnittelukohteissa.

Lähdeluettelo

- [1] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010). Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials, Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA, 10 s.
- [2] RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y., Helsinki, 384 s. + 116 liites.
- [3] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden ja rakennusten rakennusfysikaalisessa toiminnassa, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.

Rakennusfysikaalisten testivuosien päivitystyö rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeen osana

Anssi Laukkarinen, Teemu Jokela ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Nykyisin käytössä olevat rakennusfysikaaliset testivuodet on määritetty noin kymmenen vuotta sitten FRAME-hankkeen osana. Nyt käynnissä olevassa rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeessa tullaan valitsemaan nämä korvaavat testivuodet, hyödyntäen syksyllä 2020 päättyneen RASMI-hankkeen tulosaineistoja. Tässä artikkelissa käydään läpi eri vuosien kriittisyysjärjestyksen määrittämiseen liittyviä periaatteita ja tuloksia sekä tämän työn pohjalla olevien simulointimallien muodostamista. Hankkeen lopulliset tulokset esitetään alkuvuodesta 2022 valmistuvassa loppuraportissa.

1. Johdanto

Rakennusfysikaalisilla testivuosilla tarkoitetaan tunnittaisia säädädata-aineistoja, joita talonrakentamisen eri osapuolet voivat hyödyntää rakenteiden rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ja muissa aiheeseen liittyvissä tehtävissä [1, 2, 3, 4, 5]. Nykyisin Suomessa käytössä olevat testivuodet on määritetty noin 10 vuotta sitten FRAME-tutkimushankkeen osana, jolloin testivuodet valittiin hyödyntäen Ilmatieteen laitoksen havaintoaineistoja neljältä eri paikkakunnalta vuosilta 1980–2009 sekä SRES A2 -päästöskenaarion mukaisia ilmastomuutosennusteita vuosien 2050 ja 2100 ympäristöstä [6, 7].

Aikavälillä 2021/03 - 2022/02 toteutettavassa rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeessa yhtenä keskeisenä toimenpiteenä on valita uudet rakennusfysikaaliset testivuodet hyödyntäen Ilmatieteen laitoksen RASMI-hankkeesta [8] määrittämiä Sodankylän, Jyväskylän, Jokioisen ja Vantaan toteutuneita ilmasto-olosuhteita vuosilta 1989-2018 sekä näitä vastaavia kasvihuonekaasujen mahdollisten kehityskulkujen RCP 2.6, 4.5 ja 8.5 mukaisia ilmastomuutosennusteita vuosia 2030, 2050 ja 2080 ympäröiviin 30-vuotisiin jaksoihin. Hankkeen osana rakennusfysikaalisiin testivuosiin lisätään myös ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoasteilyn tuntiaineistot.

Tämän artikkelin kaksi keskeisintä tavoitetta ovat: i) käydä läpi eri vuosien kriittisyysjärjestyksen määrittämisen periaatteita ja alustavia tuloksia, ja ii) kuvata simulointimallien muodostamisen periaatteita ja yksityiskohtia.

2. Vuosien kriittisyysjärjestyksen määrittämisen periaatteita ja alustavia tuloksia

2.1 Periaatteita

Rakennusfysikaalisella testivuodella tarkoitetaan tässä yhteydessä sellaista vuoden mittaista ajanjaksoa, jollaisia vastaavia tai kriittisempiä olosuhteita esiintyy tilastollisesti enintään kerran kymmenessä vuodessa. Tällöin nn vuoden mittaisissa aikasarjoissa on keskimäärin $nn/10$ kpl yhtä kriittisiä ja kriittisempiä vuosia, kuin valittu testivuosi. Tämän perusteella esimerkiksi 30 vuoden

joukosta valitaan testivuodeksi kriittisyydeltään 3. kriittisin vuosi, kun vuodet järjestetään mitoitusohjeen mukaiseen kriittisyysjärjestykseen.

Vuosien asettaminen kriittisyysjärjestykseen on mahdollista tehdä usealla eri tavalla, eikä asiaan ole olemassa yksiselitteisesti parasta menettelyä. Tämä johtuu siitä, että vuosien kriittisyysjärjestys riippuu muun muassa käytettävästä laskentamenetelmästä, tarkasteltavista rakenteista ja laskentatulosten arviointimenetelyistä, eli toisin sanoen määritysprojektin tavoitteenasettelusta. Rakentamisen mitoitusohje (RAMI) -hankkeessa lähtökohtia ovat olleet, että a) testivuosien pääasiallinen käyttökohteet ovat ajasta riippuvat rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan simuloinnit, b) simuloineilla tarkastellaan tavanomaisia rakenteita ja todennäköisiä simulointitapauksia ensisijaisesti rakenteiden käyttötilanteen kannalta ja c) pääpaino tulosten arvioinnissa on Suomalaisen homemallin mukaisella homeindeksin vuotuisella maksimiarvolla.

Kahden ensimmäisen kohdan yhdistävä ajatus on, että vuosien kriittisyysjärjestys pyritään määrittämään mahdollisimman pitkälle samoilla menetelmillä, kuin mikä on valittavien testivuosien todennäköinen ja tarkoitettu käyttötapa. Tämän tarkoituksena on vähentää uusien käyttötilanteiden ja laskettavien rakenteiden itsensä aiheuttamia poikkeamia eri vuosien kriittisyysjärjestyksessä. Linjaus poikkeaa aikaisemmasta FRAME-hankkeesta selkeimmin juuri laskettavien rakenteiden osalta, jossa käytettiin mahdollisia, mutta toiminnaltaan melko kriittisiä rakenneratkaisuja eri vuosien välisten erojen näkyville saamiseksi.

Selvitysten pääpaino on simuloineissa, koska nämä nähdään tällä hetkellä kustannustehokkaimmaksi laskelmien tarkkuuden ja vaaditun työmäärän yhdistelmäksi. Hankkeessa arvioidaan kuitenkin myös yksinkertaisempien laskentamenetelmien hyödyntämistä. Simulointien toteuttamista on kuvattu tarkemmin luvussa 3.

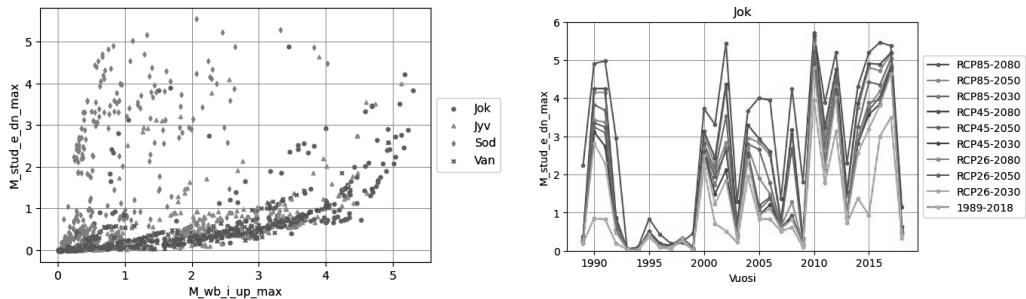
Homeen kasvun käyttäminen rakenteen toimivuuden mittarina voidaan nähdä kohtuullisen hyvin kattavan myös osan muista vaurioitumismekanismeista, kuten puun lahon ja teräksen korroosion. Näiden lisäksi on kuitenkin olemassa myös muita vaurioitumistapoja ja ilmiöitä, joiden osalta homeindeksi ei välttämättä tuota parasta mahdollista vuosien kriittisyysjärjestyä. Tällaisia ovat esimerkiksi lähes vakioilämpötilassa tapahtuva betonirakenteiden kuivuminen, rakenteiden ja niiden julkisivujen lämpö- ja kosteusliikkeet, paikalliset rasitukset sade- ja ilmavuodoista sekä ilmanpaine-erojen aiheuttama epäpuhtauksien kulkeutuminen rakenteista sisäilmaan. Näiden ilmiöiden hallinta on kuitenkin arvioitu sellaisiksi, että ne tehdään tällä hetkellä joka tapauksessa pääosin muilla tavoin kuin rakennusfysikaalisten simulaatioiden avulla. Tällaisia keinoja ovat esimerkiksi rakennustyön aikainen sääsuojaus, betonin kosteusmittaukset, ilmatilavuusmittaus, lämpökuvaus sekä vaativien yksityiskohtien huolellinen suunnittelu ja toteutus. Simulaatiotuloksista seurataan kuitenkin homeindeksin lisäksi myös muita tulossuureita kattavamman kokonaiskuvan saamiseksi.

2.2 Alustavia tuloksia

Rakentamisen mitoitusohje -hankkeessa on linjattu, että vaikka RASMI-aineistossa on säädettäviä neljältä eri paikkakunnalta, käsitellään Suomi testivuosien valinnan suhteen yhtenä alueena. Tällöin jos mitattuja havaintoaineiston vuosia tarkasteltaisiin yhtenä kokonaisuutena, tulisi testivuodeksi valita tiettyä ajanjaksoa kuvaavan aineiston kahdenneksitoista $((4 \cdot 30) / 10 = 12)$ kriittisin vuosi. Hankkeen aikana on kuitenkin havaittu, että vaikka useissa tapauksissa eri paikkakuntien vuodet lomittuvat kriittisyysjärjestyä tarkasteltaessa, joillakin rakenne- mitoitusohje-yhdistelmillä yksittäinen havaintoasema saattaa muodostaa suuren osan kaikkein

kriittisimmistä vuosista. Jos testivuosi valittaisiin tällaisessa tilanteessa kaikkien neljän paikkakunnan aineistosta, esiintyisi valittu testivuosi tilastollisesti rakennusfysikaalisesti haastavampien olosuhteiden paikkakunnalla mitoitusetta useammin. Tämän vuoksi testivuoden tai -vuosien valinta tehdään paikkakuntaakohtaisista 30 vuoden jaksosta, mikä tapauskohtaisesti tuottaa ylimääräistä varmuutta joidenkin muiden havaintoasemien olosuhteisiin, mutta samalla täyttää tavoitellun mitoitus ehdon myös rakennusfysikaalisesti raskaampien ilmasto-olosuhteiden alueella.

Yksi testivuosien valintaa helpottava tekijä on se, että vuosien kriittisyysjärjestys paikkakuntaakohtaisissa 30 vuoden aikasarjoissa näyttää säilyvän pääosin hyvin mitatun havaintoaineiston sekä RCP-skenaarioiden ja eri ennusteajavälien kesken, mikä havaittiin myös aiemmassa FRAME-hankkeessa. Koska valittavia testivuosia tullaan joka tapauksessa käyttämään uusille rakenteille ja tulevaisuudessa toteutuvat ilmasto-olosuhteet poikkeavat yksityiskohdissaan joka tapauksessa ilmakehämalleilla nyt laadituista ennusteista, määritetään vuosien kriittisyysjärjestys kaikkien kymmenen aikasarjan tai painotuksista riippuen tietyn osajoukon tulosten keskiarvona. Tämä menettely parantaa valitun vuoden kriittisyystason luotettavuutta, yksinkertaistaa valintamenettelyä ja määrittää testivuoden samalla kertaa kaikille käytettävissä oleville aikasarjoille. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkejä tulostuloksista.



Kuva 1. Esimerkkejä laskennan tuloksista. Vasemmassa kuvassa eri paikkakuntien välillä on havaittavissa datapisteiden jakautumista eri ryhmiin. Oikeassa kuvassa on havainnollistettu eri aikasarjojen välistä korrelaatiota vuosien kriittisyysjärjestyksessä.

FRAME-hankkeessa määritettyjen testivuosien käytön ohje on ollut, että ensisijaisesti ulkoilman kosteuden kuormittamille rakenteille käytetään Jokioisten testivuosia, viistosateen rasittamille rakenteille Vantaan testivuosia ja epäselville tapauksille laskelmat tehdään molemmilla vuosilla. Tämä on sinällään selkeä jaotteluperuste, mutta samaan aikaan tiedetään, että myös esimerkiksi sisäilman olosuhteet ja rakennusmateriaalien materiaaliominaisuudet voivat vaikuttaa keskeisellä tavalla rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Yhtenä tutkimuskysymyksenä on näin ollen ollut, että miten eri vuosien kriittisyysjärjestys säilyy ja miten uudet suunnittelutapaukset tulisi ryhmitellä testivuosien käytön näkökulmasta, kun rakenteen toimintaan vaikuttavat yhtä aikaa useat erilaiset tekijät. Parhaassa tilanteessa valitut testivuodet säilyttävät sijoituksensa eri vuosien välisessä vertailussa lähtötiedoissa esiintyvistä vaihtelusta huolimatta.

Edellä kuvattujen tekijöiden selvittämiseksi eri rakenteista on muodostettu $n = 2, 3$ tai 4 muuttujan (faktorin) ja kahden tason täysiä yhdistelykokeita (full factorial design), joissa jokaiselle muuttujalle määritetään ”matala” ja ”korkea” arvo. Tämän jälkeen laskentatapaukset saadaan muodostettua ristiintaulukoimalla kaikki yhdistelmät läpi, jolloin laskettavien tapauksen kokonaismääräksi tulee 2^n . Tällaisia pieniä otoksia tehdään useille eri rakenteille, jolloin

kokonaisuudessaan muodostuu useita erityyppisiä vertailuja simulointien tulosaineistoon. Näitä simulointituloksia saadaan hyödynnettyä vuosien kriittisyysjärjestyksen määrittämisessä, eri tapausten optimaalisen ryhmittelytavan määrittämiseen sekä tulosten herkkyyden arvioinnissa.

Eri laskentatapausten optimaalisen ryhmittelytavan määrittämisessä hyödynnetään koneoppimiseen perustuvia ryhmittelyalgoritmeja (clustering) sekä tulosten visualisointeja korrelaatiomatriisikuvaajien ja dendrogrammien avulla.

3. Simulointimallien muodostamisen periaatteita ja yksityiskohtia

Erilaisista laskentamalleista saataviin lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden tuloksiin vaikuttavat useat eri asiat siinä määrin, että toistettavien tulosten saaminen edellyttää ohjeita ja linjauksia niiden tekemiseen. Laskentatarkastelut voidaan nähdä jatkumoksi, jossa yhdessä päässä ovat yksinkertaiset nyrkkisäännöt rakenteen sisä- ja ulko-osien vesihöyrynvastuksista sekä höyrynsulun ulkopuolisesta lämmöneristeestä; tämän jälkeen SFS-EN ISO 13788 [9] mukaiset kuukausitason laskelmat; seuraavaksi SFS-EN 15026 [5] mukaiset ajasta riippuvat simuloinnit; ja lopuksi erilaiset tutkimus- ja kehityshankkeissa kehitettävät ja hyödynnettävät räätälöidyt simulointimallit. Keskeinen kysymys laskentamallin valinnassa on, että miten saavutetaan riittävä laskentatulosten tarkkuus kohtuullisella työmäärällä?

Standardi SFS-EN 15026 määrittelee rakenteiden yhdistetyn lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan ajasta riippuvan simulointimallin perusrakenteen, joka on käytössä myös isoimmissa rakennusfysiikan alan kaupallisissa simulaatio-ohjelmissa, kuten WUFI, Delphin ja COMSOL Multiphysics. Käytännössä, kun simuloinnit tehdään edellisillä tai vastaavan tasoilla ohjelmilla, ovat standardin mukaiset ehdot asetettavissa suoraan ohjelmien asetusvalikoista tai muutoin toteutettavissa kohtuullisella vaivalla.

Käytännössä kuitenkin melko nopeasti muodostuu tarve soveltaa standardin ohjeita kulloinkin käsillä olevaan tapaukseen. Vaikka ajasta riippuvat lämpö-kosteus-simuloinnit ovat huomattavasti kuukausitason laskentamenetelmiä yksityiskohtaisempia, on standardin mukaisessa (ja samalla tyypillisessä kaupallisessa simulointimallissa) useita rajoituksia ja yksinkertaistuksia todellisen rakenteen käyttäytymiseen nähden. Näitä rajoituksia on esitetty esimerkiksi SFS-EN 15026 -standardin luvuissa 1 ja 4.1. Seuraavat ilmiöt ja tekijät on rajattu standardin sovellusalueesta pois: ilman konvektiovirtaukset rakenteessa olevien rakojen ja reikien läpi, geometrian kaksi- ja kolmiulotteisuus, lämpötilan vuorokausikeskiarvo rakenteessa ylittää 50 °C, lämpötila- ja kosteusmuodonmuutokset, kemialliset reaktiot (esimerkiksi sementin hydrataatio), veden faasimuutosenergian lämpötilariippuvuus, materiaaliominaisuuksien muuttuminen ikääntymisen ja vaurioitumisen seurauksena, kosteusfaasien paikallinen epätasapaino, tasapainokosteuskäyrän hystereesi ja lämpötilariippuvuus, sekä lämpötilan ja kokonaispaineen vaikutukset vesihöyrynsä diffuusion. Simulaatiomallit sisältävät usein myös muita yksinkertaistuksia ja virhelähteitä, kuten huokosveden jääntymisen ja sulamisen puuttuminen sekä puutteet materiaaliominaisuuksien tuntemisessa.

Nyt tehtävässä testivuotien kriittisyysjärjestyksen määrittämisessä laskentamallit on pyritty muodostamaan siten, että niissä rajaudutaan SFS-EN 15026:2007 mukaisiin lämmön- ja kosteudensiirron ilmiöihin, mutta kiinnittäen erityistä huomiota laskennan lähtötietojen valintaan. Tämän tavoitteena on parantaa laskelmien toistettavuutta ja selkiyttää lähtötietojen valintaa, mikä kuitenkin samalla tapahtuu laskelmien tarkkuuden kustannuksella.

Seuraavassa on esitetty standardin ohjeita täydentäviä periaatteita liittyen laskentamallien muodostamiseen rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeessa:

- Rakeneratkaisun geometria tulee säilyttää mahdollisimman pitkälle oikean kaltaisena. Laskentamallissa tulee olla mukana kaikki todellisessa rakenteessa esiintyvät rakennekerrokset joko geometriaelementteinä tai vastusarvoina mallinnettuna. Ellei kyseessä ole selkeästi yksiulotteinen kerroksellinen rakenne, tulee rakenne mallintaa geometrialtaan kaksiulotteisena mallina. Geometrialtaan kolmiulotteisen laskentamallin laatimista ei kuitenkaan edellytetä.
- Lähtökohtaisesti laskentamalleissa voidaan käyttää laskentaohjelmien materiaalikirjastoista (esimerkiksi WUFI ja Delphin) löytyviä materiaaliominaisuuksia, kunhan näissä olevat lukuarvot vastaavat tarkasteltavaa tapausta suuruusluokaltaan oikein. Jos yksityiskohtaiset arvot ovat perustellusti saatavilla ja kohtuullisella työllä päivitettävissä, tulee nämä päivittää laskentamalliin.
- Laskennan reunaehdot määritetään siten, että kuivien tilojen rakenteiden sisäpuolella otetaan huomioon konvektion ja säteilyn yhdistetty lämmönsiirto, määrittäen näiden ekvivalentti lämpötila (ks. SFS-EN 15026) suoraan laskennan lähtötietona. Rakenteiden ulkopinnoilla otetaan huomioon konvektiivinen lämmönsiirto ja vesihöyryn diffuusio ulkopinnan ja ulkoilman välillä, auringonsäteily ulkopinnalle, pitkäaaltoisen säteilyn tase ulkopinnan ja ilmakehän välillä sekä sade/viistosade ulkopinnalle. Pitkäaaltoinen säteily rakenteen ulkopinnan ja muiden ympäröivien kiinteiden pintojen välillä (maanpinta, muut rakennukset, puut ja pensaat) on jätetty laskelmista pois. Lumisateen rajaksi on asetettu 0 °C.
- Rakenteen ulkopinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ja vesihöyrynvastus riippuvat paikallisesta tuulennopeudesta standardin SFS-EN 15026 [5] mukaisesti ja viistosateen määrä seinäpinnalle standardin SFS-EN ISO 15927-3 [10] mukaisesti. Paikallinen tuulennopeuden voidaan laskea standardin SFS-EN 15927-3 tai SFS-EN 1991-1-4 [11] mukaisella maaston rosaisuuskertoimella CC_{RR} (terrain roughness) ja ottamalla se mukaan laskentaohjelmaan syötettävään pinnan siirtokertoimeen, jolloin vältetään tekemästä muutoksia testivuosiaineistoihin.
- Tuuletusurien tai -välien käsittely malleissa voidaan tehdä vakiosuuruisen ilmanvaihtuvuuden avulla.

Sisäilman olosuhteiden määrittämistä, tulosten jälkikäsitteilyä (esimerkiksi suomalaisen homemallin avulla) ja rakenteen toimivuuden arviointia on ohjeistettu lisää esimerkiksi julkaisuissa RIL 107-2012 [12] ja RIL 250-2020 [13].

Edellä olevassa listassa on pyritty noudattamaan simulaatioiden toistettavuuden periaatetta ja selkiyttämään käytännön laskentatyötä. Samalla listauksesta on kuitenkin nähtävissä, että laskentamalleja on tilanteen mukaan mahdollista tarkentaa usein eri tavoin. Tällöin ohjaavana periaatteena tulisi olla, että tarkemmasta laskentamallista saadut tulokset ovat etusijalla yksinkertaistetumpaan nähden, kun muut tekijät pysyvät samoina. Näin ollen esimerkiksi 2D-rakennemalli on etusijalla 1D-malliin nähden, räätälöidyt materiaaliominaisuudet ovat etusijalla yleisempiin kirjastomateriaaleihin nähden, useampia kosteusrasituksia huomioon ottavat laskentamallit ovat etusijalla nämä ilmiöt pois jättäviin malleihin verrattuna ja tarkemmin tuuletusilmavirtaukset käsittelevä malli on etusijalla ilmanvaihtuvuuden käyttöön nähden.

Enemmän asioita huomioon ottavan SFS-EN 15026 mukaisen simulaatiomallin tulosten katsotaan olevan etusijalla yksinkertaisemman SFS-EN ISO 13788 mukaisen kuukausitason laskennan tuloksiin nähden, kun molemmat laskelmat on tehty hyvää huolellisuutta noudattaen.

4. Yhteenveto

Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hanke on mielenkiintoinen kokonaisuus, jossa hyödynnetään eri tavoin juuri päättyneen RASMI-hankkeen tulospaineistoja. Tässä artikkelissa kuvattiin rakennusfysiikan uusien testivuosien määrittely- ja valintaprosessiin liittyviä tuloksia ja tulkintoja. Lisäksi artikkelissa esitettiin hankkeen simuloinneissa käytettyjä periaatteita, jotka nähdään laajemminkin hyödyllisinä simulointien toistettavuuden edistämiseksi.

Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hanke on syksyllä 2021 pidettävän rakennusfysiikkaseminaarin pitämisen aikaan vielä kesken ja edellä kuvattuihin seikkoihin voi tulla vielä muutoksia. Jos haluat lähettää palautetta tai tarkennuspyyntöjä liittyen kokemuksiin aikaisemmista rakennusfysikaalisista testivuosista, voit tehdä sen lähettämällä sähköpostia Anssi Laukkariselle (anssi.laukkarinen@tuni.fi). Lopulliset tulokset esitetään hankkeen loppuraportissa.

Lähdeluettelo

- [1] S. Cornick, R. Djebbar ja W. A. Dalglish, "Selecting moisture reference years using a Moisture Index Approach," *Building and Environment*, osa/vuosik. 38, pp. 1367-1379, 2003.
- [2] T. Schöner ja D. Zirkelbach, "Development of hygrothermal reference years for Germany," tekijä: *CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, Dresden, Germany, 2016.
- [3] X. Zhou, D. Derome ja J. Carmeliet, "Robust moisture reference year methodology for hygrothermal simulations," *Building and Environment*, osa/vuosik. 110, pp. 23-35, 2016.
- [4] IEA ECBCS Annex 24, *Heat, Air and Moisture Transfer in Highly Insulated Building Envelopes (HAMTIE). Technical Synthesis Report*, 2002.
- [5] SFS-EN 15026, *Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation*, Suomen standardoimisliitto SFS, 2007.
- [6] J. Vinha, A. Laukkarinen, M. Mäkitalo, S. Nurmi, P. Huttunen, T. Pakkanen, P. Kero, E. Manelius, J. Lahdensivu, A. Köliö, K. Lähdesmäki, J. Piironen, V. Kuhno, M. Pirinen, A. Aaltonen ja J. Suonketo, *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos: 2013, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>.
- [7] K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Mäkelä, R. Hyvönen, P. Pirinen ja I. Lehtonen, "Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa REFI-B-hankkeen tuloksia," *Ilmatieteen laitos. Raportteja 2013:1*, 2013.
- [8] K. Jylhä, K. Ruosteenoja, H. Böök, A. Lindfors, P. Pirinen, M. Laapas ja A. Mäkelä, "Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten.," *Ilmatieteen laitos. Raportteja 2020:6*, 2020.
- [9] SFS-EN ISO 13788, *Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods.*, Helsinki: SFS ry, 2013.
- [10] SFS-EN ISO 15927-3, *Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [11] SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1, *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat*, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2011.
- [12] RIL 107, *Rakennusten kosteuden- ja vedeneristys*, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 2012.
- [13] RIL 250-2020, *Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen*, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ril ry, 2020.

Julkisivujen pitkäaikaisestävyyden rasisolosuhteet

Toni Pakkala ja Jukka Lahdensivu

Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakenteiden korjaaminen ja elinkaaritekniikka

Tiivistelmä

Ympäristöministeriö on käynnistänyt hankkeen Rakentamisen mitoitussäät (RAMI), jossa Tampereen yliopisto, Aalto-yliopisto ja Ilmatieteen laitos selvittävät yhdessä rakentamisen mitoituserusteita ja -aineistoa rakenteiden rakennusfysikaalista mitoitusta ja rakennusten sisäolosuhteita varten. Yksi Tampereen yliopiston osa-alueista hankkeessa on julkisivurakenteiden pitkäaikaisestävyyden kannalta kriittisten rasisolosuhteiden tunnistaminen ja kyseisten olosuhteiden muuttuminen tulevaisuuden ilmastossa. Julkisivurakenteisiin liittyvässä tutkimusosiossa selvitetään olemassa olevan rakennuskannan vaurioitumisen ja säärasituksen tason laskennallisten tarkastelujen pohjalta kriittiset vuotuiset rasisolosuhteet huokoisten kiviainespohjaisten materiaalien pakkasrasituksen ja betoniraudoitteiden korroosion kannalta. Tarkastelut tehdään RASMI-aineiston kolmelle eri päästöskenaarion tilanteelle. Tuloksena saadaan arvioitua tulevaisuuden sääolosuhteiden rankkuutta olemassa olevaan rakennuskantaan sekä sen vaikutusta korjausten sekä uudisrakentamisen suunnitteluun. Tämän artikkelin kirjoitusaikaan on laskettu sateen jälkeiset jäätymis-sulamissyklistä sekä sademäärät ennen syklejä kolmella eri skenaariolla Vantaalla 2050 ja 2080 sekä Jokioisilla 2080.

1. Johdanto

Kiviainespohjaisten sääille alttiiden rakenteiden vaurioitumiselle kriittisiksi vauriomekanismeiksi on aiemmissa tutkimuksissa todettu pakkasrapautuminen ja betonilla raudoitteiden korroosio [1, 2]. Erityisesti viistosademäärällä on havaittu erittäin suuri merkitys molempiin vauriomekanismeihin. Lahdensivu [1] havaitsi väitöstutkimuksessaan, että julkisivu- ja parvekebetonista irrotetuissa näyteliäriöissä alkavaa pakkasrapautumista havaittiin n. 80 sateen jälkeistä jäätymis-sulamissykliä aiemmin rannikolla (keskimäärin 307 sykliä) kuin sisämaassa (keskimäärin 388 sykliä). Pakkala et al. [3, 4] on havainnut tarkasteluissaan, että todennäköisin syy rannikolla tapahtuneella nopeammalle vaurioitumiselle on selkeästi suurempi viistosademäärä sisämaahan nähden. Lisäksi Pakkala et al. [4] havaitsi, että pitkälle edennyttä pakkasrapautumista on havaittu julkisivu- ja parvekerakenteissa tiettyjen ilmansuuntien puolella lähes samassa suhteessa niille ennen jäätymis-sulamissyklejä satavan viistosademäärän kanssa. Nykyilmastossa (tutkimuksen aikaan 1980–2009) selvästi suurin osuus jäätymis-sulamissyklejä edeltävästä viistosademäärästä (78 %) on tullut länsi-kaakko-suuntaisilta ilmansuunnilta, ja puolestaan ennen vuotta 1995 rakennetuilla betonijulkisivuilla 81 % pitkälle edenneestä pakkasrapautumasta on havaittu kyseisten ilmansuuntien julkisivuilla. Molempien osuus on suurempi rannikolla ja vähenee sisämaata ja Lappia kohden.

Betoniterästen korroosiovaurioituminen voidaan jakaa kahteen osaan: käynnistymisvaihe, jonka aikana betonin karbonatisoitumisrintama saavuttaa teräsvyyden ja siten menettää terästä suojaavan alkalisuutensa sekä aktiivisen korroosion vaihe, jolloin teräs alkaa ruostua ja lopulta aiheuttaa halkeaman tai lohkeaman betonin pintaan. Kyseisten vaiheiden pituus riippuu rakenteen ominaisuuksien, kuten betonin peitepaksuuden lisäksi merkittävästi rakenteen suojaisuudesta, sillä kosteus hidastaa karbonatisoitumista, mutta nopeuttaa itse korroosiota. Jos rakenne on

suojassa viistosateelta, kuten parvekelaatan alapinta, käynnistymisvaihe voi olla melko lyhyt ja aktiivisen korroosion vaihe pitkä. Jos rakenne on altis viistosateelle, kuten parvekepieli, käynnistymisvaihe voi olla melko pitkä, mutta aktiivisen korroosion vaihe hyvin lyhyt. Köliö mallinsi väitöskirjassaan [5], että esimerkiksi rannikko-olosuhteissa nykyilmastossa eteläjulkisivulla sijaitsevan parvekelaatan alapinnan korroosion käynnistymisvaihe on n. 10 vuotta, pielellä n. 12 vuotta ja julkisivulla 25 vuotta. Aktiivisen korroosion vaiheen kesto puolestaan olisi vastaavilla rakenteilla 80 vuotta, 2 vuotta ja 3 vuotta.

Tässä artikkelissa esiteltävän tutkimuksen pakkasrapautumisen rasiustason arviointi tehdään rasiustasoa kuvaavan jäätymis-sulamissykliä määrän avulla, määrittäen nämä uudelle Ilmatieteen laitoksen tuottamalle 30 vuoden tuntiaineistolle nyky- ja tulevaisuuden ilmastosta (RASMI-aineisto) ottaen huomioon myös viistosateen määrän erisuuntaisille julkisivupinnoille. Raudoitteiden korroosiotarkasteluissa hyödynnetään laskennallisen karbonatisoitumisen yleisiä laskennallisia malleja sekä Tampereen yliopiston Rakenteiden korjaamisen ja elinkaaritekniikan tutkimusryhmässä kehitettyä ja aikaisempaa kattavampaa aktiivisen korroosion laskentamallia. Tarkastelut tehdään RASMI-aineiston kolmelle eri päästöskenaarion tilanteelle ja tuloksia verrataan aiemman FRAME-hankkeen tuloksiin. Tuloksena saadaan arvioitua tulevaisuuden sääolosuhteiden rankkuutta olemassa olevaan rakennuskantaan sekä sen vaikutusta korjausten sekä uudisrakentamisen suunnitteluun.

2. Tutkimusmenetelmät

2.1 Pakkasrapautuminen

Kiviainespohjaisten, säälle alttiiden julkisivurakenteiden, kuten betoni, tiili ja rappaus, pakkasrapautuminen perustuu materiaalien altistumiseen jäätymis-sulamisrasitukselle silloin, kun niiden huokosverkostossa on riittävä määrä vettä. Varsinaiseen pakkasrapautumisen mekanismiin on useita erilaisia teorioita [6], mutta yksinkertaistetusti yleensä käytetään hydraulisen paineen teoriaa [7], jonka mukaan huokosverkostossa jäätyvän veden laajeneminen aiheuttaa hydraulisen paineen huokosverkostoon, mikä aiheuttaa sisäisiä jännityksiä ja voi lopulta johtaa halkeaman syntyyn. Mitä pienemmistä huokosista puhutaan sitä matalampi on huokosverkostossa vapaana olevan veden jäätyislämpötila. Käytännössä kapillaarihuokosten tapauksessa jäätyislämpötila on noin $-5 \dots -10 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]. Pakkasrapautumiselta voidaan suojautua mm. lisähuokostuksella, jossa huokoiseen materiaaliin saadaan sopivan kokoisia suojahuokosia sopivalle etäisyydelle toisistaan, jolloin jäätyminen aiheuttama huokospaine pääsee purkautumaan niihin. Kuten Lahdensivu [1] on esittänyt, olemassa olevassa rakennuskannassa suojahuokostus on ollut kuitenkin usein puutteellista vielä nykymääräyksiä vastaavilla vaatimuksella tehdyissä betonirakennuksissa.

Pakkasrapautumisen mallintamiseen tai sen riskin laskennalliseen tarkasteluun ei ole maailmanlaajuisestikaan kehitetty käytännöllisiä menetelmiä [9]. Norjassa Lisø et al. [10] esittelivät yhdistelmän, jossa tarkastellaan erikseen jäätymis-sulamissykliä vuosittaista määrää sekä niitä edeltävän sademäärän vuosisummaa. Pakkala [9] arvioi väitöskirjassaan, että tarkastelu on puutteellinen mm. siksi, että jäätymis-sulamissykleissä on tarkastelu kaikkia syklejä eikä syklejä, joita on edeltänyt vesi- tai räntäsade. Aiemmin Pakkala et al. [4] oli esittänyt, että viistosademäärällä ennen jäätymis-sulamissyklejä on hyvin selkeä yhteys havaittuihin rapautumavaurioihin. Tässä tutkimuksessa hyödynnetään kyseisiä havaintoja ja tarkastellaan erityisesti julkisivulle satavaa viistosademäärää maksimissaan 72 tuntia ennen $-5 \text{ }^\circ\text{C}$:een alitusta. Viistosademäärän laskenta on toteutettu standardin SFS-EN ISO 15927-3 [11] mukaisesti vapaan viistosateen kaavalla:

$$I_A = \frac{2 \sum v r^2 \cos(D-\theta)}{9N} \quad (1)$$

missä v = tuulennopeuden tuntikeskiarvo [m/s]
 r = tunnittainen kokonaissademäärä [mm]
 D = tunnittainen tuulen suunnan keskiarvo [°]
 θ = seinän suunta suhteessa pohjoiseen [°]
 N = tarkasteltavan aineiston vuosien määrä

Kaavan (1) summa lasketaan kaikilta tunneilta, jolloin lause $\cos(D - \theta)$ on positiivinen. Koska standardi ei ota huomioon, tuleeko sade vetenä, räntänä vai lumena, laskennan lisämääreeksi on otettu vaatimus, että sadehetkellä ilman lämpötila on yli 0 °C. Laskenta on toteutettu sekä vuoden kokonaissademääränä ennen jäätymis-sulamissyklejä että keskimääräisenä sademääränä ennen yksittäistä jäätymis-sulamissykliä.

Tutkimusmateriaalina on käytetty Ilmatieteen laitoksen tuottamaa RASMI-aineistoa nykyilmastolle (vuosien 1989–2019 tunnittainen mittausdata) sekä kolmelle eri ilmastonmuutosennusteille (RCP2.6, RCP4.5 sekä RCP8.5) vuosille 2050 ja 2080. Ilmastonmuutosennusteista RCP2.6 on optimistisin teollisuuden vuoksi ilmaan päätyvän hiilidioksidimäärän suhteen ja RCP8.5 pessimistisin. Tämän artikkelin tekovaiheessa kyseiset tarkastelut on tehty rannikkoilmastoa kuvaavan Helsinki-Vantaan säähavaintoasemalle sekä eteläistä sisämaata kuvaavalle Jokioisen säähavaintoasemalle.

2.2 Raudoitteiden korrosio

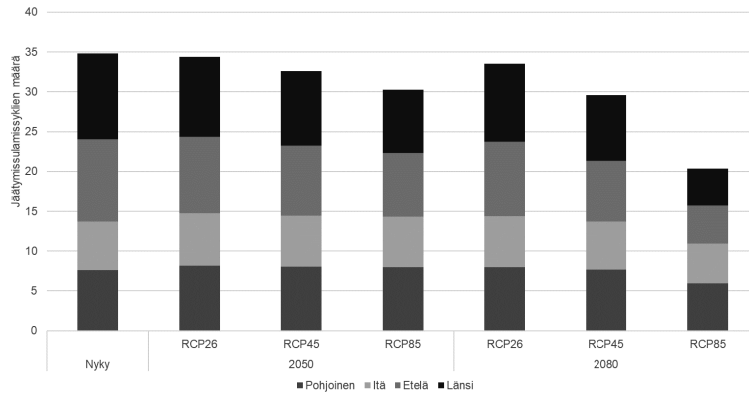
Tutkimuksessa tullaan selvittämään myös raudoitteiden korroosion käynnistymisvaiheen ja aktiivisen korroosion vaiheen mallinnusta. Koska laskenta ei artikkelia kirjoittaessa ole vielä käynnistynyt, laskentamenetelmiä ei esitellä tässä artikkelissa.

3. Tulokset

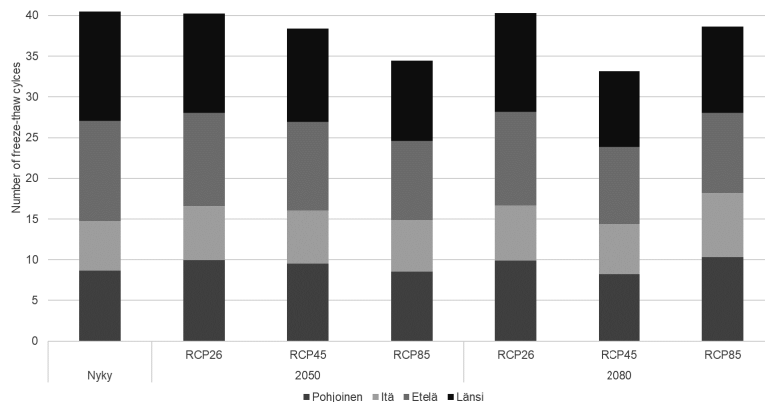
3.1 Jäätymis-sulamissyklit sateen jälkeen

Jäätymis-sulamissyklien määrä vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen on laskettu tutkimuksen tässä vaiheessa rannikkoilmastoa kuvaavan Helsinki-Vantaan säähavaintoasemalle sekä eteläistä sisämaata kuvaavalle Jokioisen säähavaintoasemalle nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2080 ilmastonmuutosennusteilla. Laskennan tulokset Helsinki-Vantaalle on esitetty kuvassa 1 ja Jokioiselle kuvassa 2.

Kuten kuvaajista nähdään, jäätymis-sulamissyklien määrä sateen jälkeen tulee ennusteista riippuen vähenemään melko maltillisesti riippumatta siitä, tarkastellaanko rannikkoa vai eteläistä sisämaata. Merkittävin eroavaisuus tulee esiin vasta ennusteen RCP8.5 kohdalla vuonna 2080, jossa rannikolla syklimäärä putoaa 58 %:iin nykytilanteesta. Eteläisessä sisämaassa puolestaan kyseisen ennusteen mukaan määrä nousee vuoden 2050 tilanteesta takaisin lähemmäs nykytilannetta.



Kuva 1. Jäätymis-sulamissykliä maksimissaan 72 tuntia vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen Helsinki-Vantaalla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

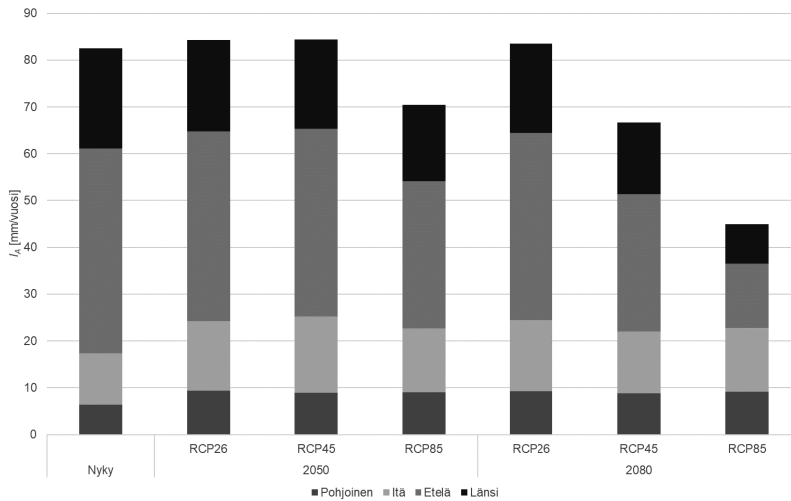


Kuva 2. Jäätymis-sulamissykliä maksimissaan 72 tuntia vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen Jokioisilla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

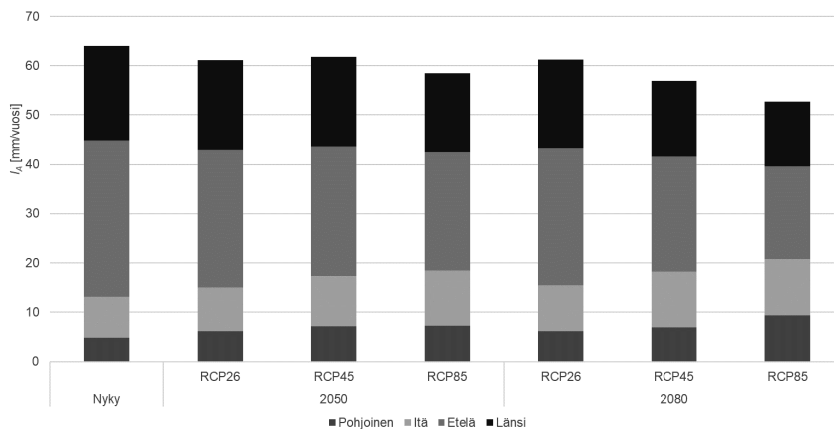
Lahdensivun väitöskirjassaan [2] esittämän, nykyilmastossa rannikolla alkavaan pakkasrapautumiseen vaadittu sateen jälkeinen jäätymis-sulamissyklimäärä (307 kpl) saavutettaisiin laskennan mukaan nopeimmin, n. 31 vuodessa, ennusteen RCP2.6 vuoden 2050 ilmastossa länsijulkisivulla. Hitaimmin, n. 64 vuodessa, se saavutettaisiin niin ikään länsijulkisivulla ennusteen RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sisämaassa nykyilmastossa alkavaan pakkasrapautumiseen vaadittu jäätymis-sulamissyklimäärä (388 kpl) saavutettaisiin nopeimmin, n. 32 vuodessa, länsijulkisivulla ennusteen RCP2.6 vuoden 2050 ilmastossa ja hitaimmin, n. 63 vuodessa, ennusteen RCP4.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sisämaatarkastelu on kuitenkin aiemmin tehty Jyväskylän sääaineiston perusteella eikä siten ole suoraan vertailukelpoinen.

3.2 Viistosademäärä jäätymis-sulamissykliä jälkeen

Vuotuinen viistosademäärä ennen jäätymis-sulamissyklejä rannikolla ja eteläisessä sisämaassa on esitelty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Maksimissaan 72 h ennen jäätymis-sulamissyklejä vetenä tai räntänä tulleen viistosateen vuosisumma Helsinki-Vantaalla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.



Kuva 4. Maksimissaan 72 h ennen jäätymis-sulamissyklejä vetenä tai räntänä tulleen viistosateen vuosisumma Jokioisilla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

Toisin kuin sateen jälkeisissä sykleissä, viistosademäärässä ennen kyseisiä syklejä voi ennusteesta riippuen tapahtua jopa kasvua. Rannikolla kasvua tapahtuu ennusteella RCP2.6 niin 2050 kuin 2080 ennusteellakin. Sen sijaan ennusteella RCP8.5 syklejä edeltävä viistosademäärä putoaa jo 2050 ja merkittävästi (46 %) vuonna 2080. Jokioisilla erot nykytilanteeseen ovat hyvin vähäisiä ja määrät ovat myös huomattavasti rannikkoa pienemmät kaikilla ennusteilla paitsi RCP8.5 vuonna 2080. Kaikissa tapauksissa tapahtuu pudotusta nykyilmastossa rankimmin rasi- ja länsijulkisivuilla. Erityisesti itäjulkisivuilla puolestaan tapahtuu kasvua.

Tarkasteltaessa yksittäisen jäätymis-sulamissyklin intensiteettiä eli viistosadesademäärää ennen yksittäistä sykliä, tapahtuu kasvua rannikolla kasvua nykyilmastoon nähden kaikilla ennusteilla. Eteläisessä sisämaassa kasvua tapahtuu ennusteella RCP4.5 2050 ja 2080 ilmastoissa sekä ennusteella RCP2.6 2050 ilmastossa. Suurin kasvu (15 %) tapahtuu rannikon 2050 ilmastossa ennusteella RCP4.5.

4. Yhteenveto

Tämän artikkelin kirjoittamisen hetkeen mennessä tehdyistä laskelmista on selvinnyt, että kiviainespohjaisten julkisivumateriaalien pakkasrasituksessa ilmastonmuutoksen myötä tapahtuva muutos riippuu merkittävästi sijainnin lisäksi käytetystä ennusteesta. Rannikolla sateen jälkeisten jäätymis-sulamissykliä tulee kaikilla ennusteilla vähenemään nykyilmastoon nähden. Aiemmissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu jäätymis-sulamissyklejä edeltävän viistosateen määrän merkittävä vaikutus ja sen muutos riippuu hyvin paljon käytetystä ennusteesta. Ilman hiilidioksidipitoisuuden kannalta pessimistisimmällä RCP8.5 ennusteella pakkasrasitus tulee helpottamaan huomattavasti 2080 vuoden ilmastossa, mutta optimisimmalla ennusteella RCP2.6 puolestaan kasvamaan. Eteläisessä sisämaassa ennusteen vaikutus on huomattavasti vähäisempi eikä rasitus tule merkittävästi muuttumaan nykytilanteesta.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa selvitetään aineistosta testivuosia. Testivuosien valinta toteutetaan rakennusfysiikalisen laskennan testivuosien tapaan valitsemalla aineistosta vuodet, joita rankempaa rasitusta on enintään kerran 10 vuodessa.

Lähdeluettelo

- [1] Lahdensivu, J., Varjonen, S. ja Köliö, A. 2010. Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjausstrategiat. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 148.
- [2] Lahdensivu, J. 2012. Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University of Technology. Väitöskirja. TUT Publ. 1028. 117 s.
- [3] Pakkala, T. A., Köliö, A. Lahdensivu J. ja Kiviste M. 2014. Durability demands related to frost attack for Finnish concrete buildings in changing climate. *Building and Environment*, 82 (2014). Pp. 27–41.
- [4] Pakkala, T. A., Lahdensivu, J. Huuhka, P., Kivioja, H. ja Lemberg, A.-M. 2019. Freeze-thaw Damage Dependence on Wind-driven Rain of Outdoor Exposed Concrete – A Case Study. *Nordic Concrete Research, Publication no. 61, 2/2019*. Pp. 91–106.
- [5] Köliö, A. 2016. Propagation of Carbonation Induced Reinforcement Corrosion in Existing Concrete Facades Exposed to the Finnish Climate. Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja. TUT Publ. 1399. 147 s.
- [6] Kuosa, H. ja Vesikari, E. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1: Perusteet ja käyttöikämitoitus. VTT. VTT Tiedotteita 2056. 141 s.
- [7] Powers, T. C. 1949. The air requirement of frost-resistant concrete. Chicago: Portland Cement Association, Research and Development laboratories, Development Department. Bulletin 33.
- [8] Pigeon, M. ja Pleau, R. 1995. Durability of concrete in cold climates. London. E & FN Spon. 244 s.
- [9] Pakkala, T. 2020. Assessment of Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University Dissertations 204. 98 s. 23 liites.
- [10] Lisø, K.R., Kvande, T., Hygen, H.O., Thue, J.V. ja Harstveit, K. 2007. A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*, 42(10), Pp. 3547–3555.
- [11] SFS-EN ISO 15927-3. 2009. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki. 31 s.

Betonirakenteiden riskit esiin erikoistutkimuksilla

Jukka Hietikko ja Pekka Friberg
KIWA Inspecta

Tiivistelmä

Betonirakenteiden ainetta rikkomattomilla NDT-tutkimuksilla on selvitettävissä rakenteiden piilevät vauriot ja osittain syitä näkyville vaurioille. Tutkimuksilla on mahdollista selvittää rakenteiden suunnitelmien mukaisuus määrittämällä terästen koot ja sijainnit. Myös puutteet betonin ja terästen välisissä tartunnoissa voidaan paikallistaa. Betonivalun homogeenisuus ja mahdolliset vaurioalueet on mahdollista paikallistaa jopa massiivisista valuista.

Ultraäänimenetelmällä voidaan varmentaa injektointien onnistuminen jälkijännitetyissä rakenteissa. Esijännitetyistä rakenteista voidaan varmistaa betonin ja terästen välinen tartunta tai paikallistaa jänteiden suunnitelmien mukaiset sijainnit. Tarvittaessa voidaan tehdä jatko-tutkimuksia havaituissa vauriokohdissa joko kohteessa käyttäen perinteisiä menetelmiä tai laboratorio-olosuhteissa.

Tutkimuksissa oleellista on useiden eri tutkimus- ja mittausmenetelmien yhteiskäyttö ja soveltaminen, jotta kaikki tarvittavat tiedot rakenteista riskeineen saadaan selville. Oleellista on ymmärtää eri menetelmien toimintaperiaatteet ja rajoitteet, jotta tulosten tulkinnassa ei tehdä virheitä.

Tässä artikkelissa esitellään kolme tyypillisintä betonin NDT-tutkimusmenetelmää: Tutka-aaltoon, ultraääneen sekä sähkömagnetismiin perustuvat menetelmät.

1. Johdanto

Maailemalla ja Suomessakin on tapahtunut romahdusonnettomuuksia. Rakenteissa olevat piilevät vauriot olisi ollut havaittavissa tässä artikkelissa esitetyillä tutkimuksilla ainakin joidenkin tapausten osalta. Perinteisten ainetta rikkovien DT- tutkimusten rinnalle on kehitetty useita erilaisia tutkimuslaitteita, joilla saadaan kattavaa tietoa rakenteista. Tutkimuskohteina ovat uudet sekä käyttöikänsä päässä olevat vanhat rakenteet. Rakenteiden NDT- ja niitä täydentävillä DT-tutkimuksilla paikallistetaan esimerkiksi rakenteelliset piilevät riskit.

Vanhoista rakenteista ei usein ole olemassa rakennepiirustuksia, jolloin tutkimuksilla tuotetaan tarvittavat lähtötiedot esimerkiksi lujuuslaskentaa varten. Lisäksi korjaus- ja lisärakentamissuunnitteluun liittyen voidaan selvittää läpivientien ja kiinnitysten mahdolliset kohdat.

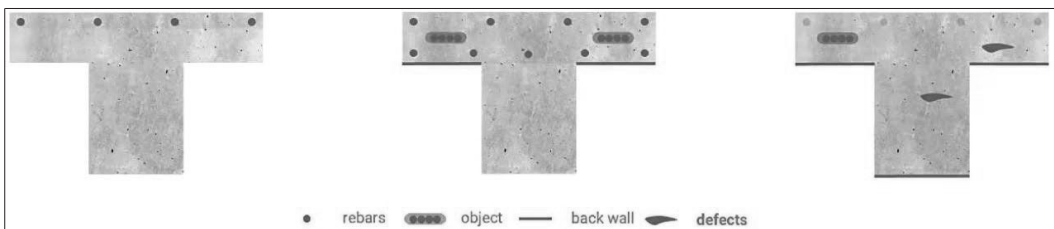
Havaitun ultraäänen nopeuden vaihtelujen perusteella voidaan arvioida betonin lujuusvaihteluja laaja-alaisissa betonirakenteissa. Näytteenotto voidaan kohdistaa oikeisiin kohtiin, kun lujuusvaihtelu on paikallistettu.

Betonirakenteiden erikoistutkimuksissa tarvitaan useiden eri NDT- ja DT-menetelmien yhteiskäyttöä riittävän tiedon saamiseksi esimerkiksi rakenteiden lujuuslaskentaan.

2. Betonirakenteiden NDT-tutkimukset

2.1 Tarkasteltavat tutkimusmenetelmät

Tämän artikkelin käsittelemät betonirakenteiden ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät ovat sähkömagneettinen tutkimus, ultraäänitutkimus ja tutka-aaltoon perustuva tutkimus. Alla olevassa kuvassa 1 esitetään näillä menetelmillä saatujen havaintojen eroja. Sähkömagneettinen tutkimus perustuu magneettiseen induktioon ja menetelmällä nähdään betonista pelkästään magneettiset metallit. Ultraäänitutkimus perustuu matalataajuisten ultraääluotauksen heijastamiin betonirakenteessa. Eri tyhjätilat ja tiheyden muutokset rakenteessa tuottavat erilaisia näyttämiä. Tutka-aalto menetelmässä laite lähettää sähkömagneettisen signaalin betoniin ja heijastuessaan betonissa olevista rajapinnoista - eli tiheyden muutoksista, takaisin laite muodostaa kuvan betonin sisältä kuvan 3 tavoin.



Kuva 1. Betonirakenteiden NDT-tutkimusmenetelmien erot havainnollistettuna vasemmalta - oikealle: magneettinen induktio (Eddy Current) - tutka-aaltotekniikka (GPR) - ultraäänitekniikka (UPE).

2.2 Betonirakenteiden ultraäänitutkimus

2.2.1 Menetelmän soveltuvuus

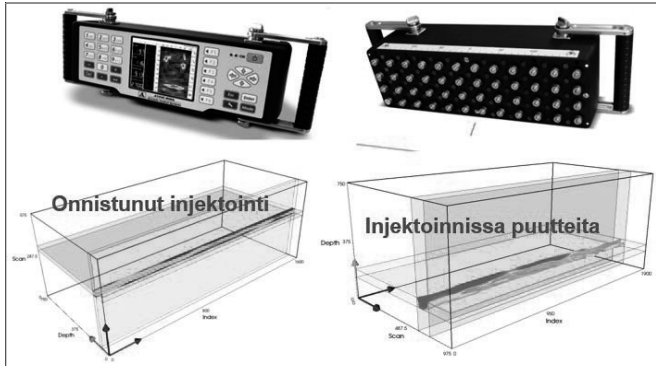
Menetelmä soveltuu erinomaisesti esimerkiksi jänneterästen injektointien tarkasteluun suojauputkien sisältä. Jännitetyissä rakenteissa käytetyillä korkealujuusteräksillä on heikko korroosionsietokyky. Injektiolaasti ja suojauputki suojaavat jänneteräksiä ulkoisilta rasituksilta. Jänneterästen korroosion vauriotyypit ja vauriomekanismit ovat erilaiset kuin betoniteräksillä. Vaurioiden (kuten säröily) havaittavuus vaurioituneena voi olla haasteellista, koska jänneteräksien ja ankkurointialueet ovat piilossa [1]. Vaurioitumismekanismi jänneteräksille tapahtuu usein jälki-injektoinnin puutteiden (ilma/vesitaskut, epäonnistunut injektointi) takia, jolloin injektiolaastin korroosiosuoja häviää ja korroosio saattaa käynnistyä. Ultraäänimenetelmällä voidaan paikallistaa potentiaaliset vauriokohdat rakenteista.

Myös muita rakennevaurioita, kuten halkeamia, tyhjätiloja ja epäjatkuvuuskohtia on mahdollista analysoida suurella tarkkuudella hyvinkin massiivisten rakenteiden osalta. Olemme tutkineet hyvin monen tyyppisiä betonirakenteita, joista osa on ollut riskirakenteita ja ilman tutkimusta seuraukset olisivat voineet olla kohtalokkaita. Tutkimuksissa olemme löytäneet esimerkiksi vajajaksi jääneitä suojauputkia ja jopa katkenneita jänneteräksiä.

2.2.2 Laitekuvaus

Esimerkkinä on kuvassa 2 esitetty ultraäänitekniikkaan perustuva tutkimuslaite MIRA A-1040, joka on betonirakenteiden ainetta rikkomattomaan (NDT) tutkimukseen kehitetty ultraäänikerroskuvauslaite. Laite käyttää matalataajuisia ultraääntä (25-85 kHz) ja saatu data perustuu

leikkausaaltojen heijastumiseen rakenteen sisältä. Luotausalueesta muodostetaan tulkintaohjelman avulla yhtenäinen 3D-kuva, jota voidaan tarkastella tietokoneella kaikissa eri leikkaustasoissa ja tarkasteltava alue on rajattavissa. Laitteisto soveltuu seinämävahvuudeltaan 50 – 2500 mm:ä olevien yhtenäisten betoni- ja kivirakenteiden tarkasteluun.



Kuva 2. Ultraäänitutkimuslaite MIRA A-1040 ja havainnekuvat injektointien luotauksesta.

2.2.3 Injektointitarkastelujen luokittelu

Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty ultraääniluotausnäyttämien luokittelussa käyttämämme jaottelu. Tyypillisesti luokittelu suoritetaan 100 mm:n etenemällä luotauksen pituussuuntaan.

Taulukko 1. Ultraääniluotaustulosten luokitteluperusteet jänneterästen injektointien tarkasteluun.

Ultraääniluotausnäyttämien luokitteluperusteet	Arvio
Injektointi on täyttänyt suojaputken, ei näyttämiä	0
Injektointimassa puuttuu osittain (vajaus arviolta 0 - 20 %)	1
Injektointimassa puuttuu osittain (vajaus arviolta 20 - 40 %)	2
Injektointimassa puuttuu osittain (vajaus arviolta 40 - 60 %)	3
Injektointimassa puuttuu osittain (vajaus arviolta 60 - 80 %)	4
Injektointimassa puuttuu kokonaan tai täysin irti suojaputken seinämästä	5
Merkittävimmät näyttämät (3 - 5) tulisi varmentaa rakenneavauksilla kohdistuen jänneterästen suojaputkiin.	3 - 5

Ultraääniluotausten näyttämissä, joissa suojaputki ei ole täyttynyt injektointimassalla tai massa on irti suojaputkenseinästä, arvio on annettu asteikolla yhdestä – viiteen (1 – 5). Onnistunut injektointi on arvioitu nollassa (0). Ultraääniluotaustuloksien analysoinnissa hyödynnetään rinnalla tutka-aaltotekniikkaan perustuvaa tutkimusdataa. Tekniikalla nähdään betoniterästen sijainnit tarkasti ja näin ollen jänneteräsavauksissa ei porata myöskään betoniteräksiin. Lisäksi jänteiden- ja suojaputkien teräskorroosioaste ja mahdollinen kosteus suojaputkissa tulee tutkimuksissa aina varmistaa. Jänneterästen korroosioasteen luokittelussa on käytetty ohjetta [2].

Ilmatiloilla suojaputkissa ja jänneteräksen tartunnalla injektointiin on rakenteen vaurionsietokyvyn kannalta oleellinen merkitys. Korkealujuusteräokset ovat korroosioherkkiä, joten tästä johtuen riskinä on terästen säröily ruostuessaan, etenkin tietyillä riskiterästyypeillä. Riskinä voi olla viivästynyt vetyhaurasmurtuma (H-SCC), jolloin teräksen vetolujuus häviää säröilyn vaikutuksesta. Ilmiössä korroosioreaktion yhteydessä atomaarisen vedyn diffuuntoituminen materiaalin huokosiin mahdollistuu. Tällöin teräsmateriaalin murtuma voi olla äkillinen ja hauras.

Injektointien tutkimus suoritetaan ultraäänimenetelmällä ja suojaputkiin kohdistettavien rakenneavauksin. Tutkittavalta alueelta otetaan useita yksittäisiä luotauksia, jotka käsittelyohjelma kokoaa yhdeksi yhtenäiseksi 3D-kuvaksi analysointia varten.

2.3 Betonirakenteiden tutka-aaltotutkimus

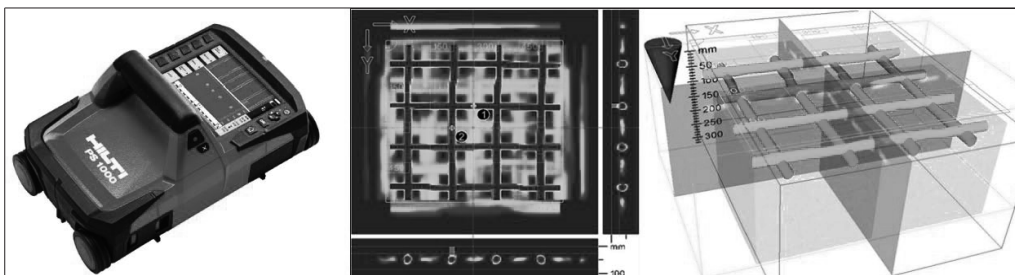
2.3.1 Menetelmän soveltuvuus

Tutka-aaltomenetelmä soveltuu muun muassa magneettisten ja ei-magneettisten metallien, muoviputkien (tyhjätilojen) sekä sähköjohtojen tunnistamiseen ja paikallistamiseen kuivien betonirakenteiden (myös kivrakenteet ja asfalttikerrokset) sisältä. Tutka-aaltotekniikalla voidaan skannata irtonaisten rakennekerrosten läpi ja laajoja alueita hyvin kustannustehokkaasti. Menetelmää käytetään usein osana laajempia betonirakenteiden erikoistutkimuksia.

Menetelmällä on mahdollista selvittää hyvinkin nopeasti erilaisten komponenttien, kuten putkien, kaapeleiden ja betoniterästen sijainti, koko ja K/K-jako tutkittavasta rakenteesta. Usein vanhoihin rakenteisiin on merkitty terästen tarkat sijainnit läpivientikohtien määrittämiseksi.

2.3.2 Laitekuvaus

Esimerkkinä on esitetty kuvassa 3 tutka-aaltotekniikkaan perustuva tutkimuslaite HILTI X-SCAN PS-1000. Laitteen toiminta perustuu eri materiaalien tiheyksien vaihteluista aiheutuvien heijastumien muodostumiseen rakenteen sisältä. Skannausdatan pohjalta voidaan analysointiohjelmalla muodostaa erilaisia yhtenäisiä 2D- ja 3D-kuvia, joten tulosten analysointi on mahdollista eri syvyyksillä ja eri leikkaustasoissa. Laitteen luotettava toimintasyvyys on jopa 400 mm:ä. Laitteella voidaan skannata yhtenäisesti 1,2 x 1,2 metrin alue tai yhtenä linjana enintään 10 metriä. Skannausdataa hyödynnetään muun muassa ultraäänitulosten analysoinnin tukena. Skannaus tietojen vieminen yleisiin suunnittelusovelluksiin on mahdollista. Tällöin skannausdataa voidaan hyödyntää korjaussuunnittelussa ja rakenteiden lujuustarkasteluissa, etenkin käytettävissä olevien piirustusten ollessa puutteellisia.



Kuva 3. HILTI PS-1000 tutka-aaltotutkimuslaite ja tulkintakuvia.

2.4 Betonirakenteiden sähkömagneettinen tutkimus

2.4.1 Menetelmän soveltuvuus

Menetelmällä voidaan paikallistaa magneettiset metallit, mitata niiden suojabetonipeitteen paksuus, terästen K/K-jako, määrät ja halkaisijat. Menetelmän tunkeutumasyvyys on maksimissaan tyypillisesti 6 - 16 cm:ä. Menetelmä soveltuu pääsääntöisesti vain ensimmäisen

kerroksen betoniterästen todentamiseen. Menetelmä soveltuu kaiken tyyppisille betonirakenteille. Pääsääntöisiä käyttökohteita ovat olleet elementtirakenteet.

2.4.2 Laitekuvaus

Esimerkkinä on kuvassa 4 esitetyt Proceqin Profometer 650A1 sekä Hiltin PS-250 näyttölaitteineen. Toiminta perustuu magneettiseen induktioon ja menetelmillä nähtävissä tarkasti terästen suojabetonipaksuudet, terästen halkaisijat sekä niiden sijainti ja teräsmäärät. Menetelmällä voidaan määrittää myös terästen sijainnit esimerkiksi rakenneavauksia tai näyteporauksia varten. Laitteilla voidaan skannata yhtenäisesti laajojakin alueita linja- tai alueskannauksin.



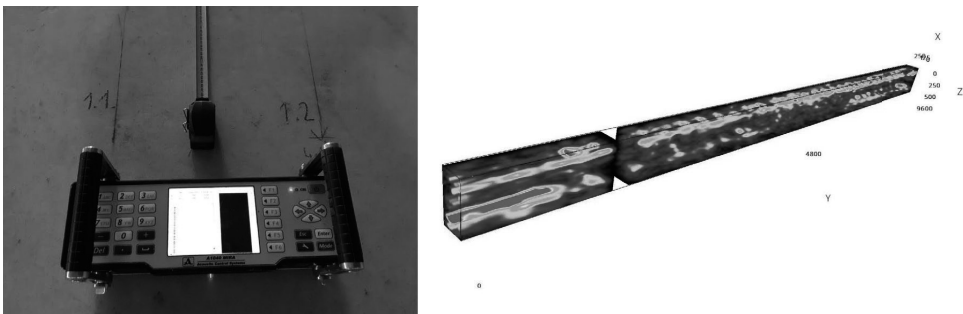
Kuva 4. Profometer PM-650A1 ja Hilti PS-250 tutkimuslaitteet.

3. Tutkimuskohteita

Yleisiä tutkimuskohteita ovat elementti- ja paikallavalurakenteet sekä taitorakenteet. NDT-laitteita käytetään apuna julkisivu- ja parveketutkimuksissa rautojen paikallistamisessa ja oikeiden porauskohteiden valinnassa.

3.1 Tutkimusesimerkki

Ontelolaatan liitos delta-palkkiin: Työmaalla epäiltiin, että ontelolaatan juotosvalut eivät ole täysin onnistuneet, jolloin rakennusvalvonta edellytti tilanteen luotettavaa selvitystä. Visuaalisella tarkastuksella ei havaittu merkkejä epäonnistumisesta. Kohteen selvityksissä käytettiin ultraäänimenetelmää ja delta-palkin sekä ontelolaatan tyhjätilat luodattiin linjaskannauksina ontelolaatan pintavalun päältä kuvan 5 tavoin. Tyhjätilan kohdalle porattiin palkkiin reiät alapuolelta ja tyhjätilat injektointiin uudelleen. Tämän jälkeen laadunvarmistustoimenpiteenä uudelleeninjektoidut kohdat skannattiin uudelleen.



Kuva 5. MIRA A-1040 ja havainne kuva tutkimuskohteen injektointien tyhjätiloista

4. Yhteenveto

Betonirakenteiden NDT-tutkimuksilla on mahdollista selvittää rakenteiden suunnitelmien mukaisuus, piilevät vauriot ja osittain syitä näkyville vaurioille. Rakenteisiin on mahdollista määrittää esimerkiksi läpivientikohtia, merkitä terästen sijainnit ja betoninäytteidenotto paikat. Tämän artikkelin käsittelemät tutkimusmenetelmät (NDT) ovat ultraääni-, tutka-aalto- ja sähkömagneettinen tutkimus.

Erikoistutkimuksissa tutkitaan tyypillisesti elementti- ja paikallavalurakenteita sekä taitorakenteita kuten sillat, vesitornit tai muut erioisbetonirakenteet. Tutkimuksista saatua tietoa on hyödynnetty korjaus- ja lisärakentamisen suunnittelussa, rakenteiden kantavuustarkasteluissa tai riskiarvioinnissa.

Pääpaino tutkimuksissa on ollut jännitetyissä rakenteissa. Jälkijännitetyissä rakenteissa huomioita on kiinnitetty erityisesti injektointien toteutumiseen ja niiden aiheuttamiin riskitekijöihin. Esijännitetyissä rakenteissa tutkimuksilla on todennettu rakenteiden suunnitelmien mukaisuutta sekä rakenteiden vaurioita.

Erikoistutkimusmenetelmillä voidaan laaja-alaisesti selvittää erityyppisten rakenteiden riskitekijöitä. Riskitekijöiden kartoituksen perusteella voidaan määrittää tarvittavat korjaustoimenpiteet ja saattaa rakenteet siten turvallisiksi.

Lähdeluettelo

- [1] Asp, O., Tulonen, J., Laaksonen, A., Jännepunosvaurion vaikutus betonisen sillan rakenteelliseen turvallisuuteen - Esiselvitys. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö - osasto. Helsinki 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2017. 56 sivua.
- [2] Raudotteiden korroosioasteen määrittäminen. Helsinki 2003. Tiehallinto, siltatekniikka. Tiehallinnon selvityksiä 48/2003, 10 sivua + 3 liitesivua.

Kylmätilarakentamisen rakennusfysikaaliset tarkastelut

Santeri Tammi, Teemu Nyysönen ja Leif Wirtanen
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Kylmätilarakentamisessa käyttötilojen vaihtelevat lämpö- ja kosteusolosuhteet tekevät rakennusfysikaalisesta suunnittelusta haastavaa. Tässä artikkelissa käsitellään kylmätilarakentamista esimerkkikohteen kautta.

Tarkasteltavan kohteen riskiliitosten laskentatarkastelu toteutettiin ratkaisemalla kolmiulotteiset liitosgeometrioiden lämpöjakaumat jatkuvuustilassa numeerisella laskentamenetelmällä Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Tilojen suuret lämpötila- ja kosteuserot, sekä rakennuksen vaipan yli vaikuttava lämpötilaero aiheuttivat runsaan määrän laskennallisesti tarkastettavia rakenteita, joissa kylmäsiltoina toimiva rakenneosat mahdollisesti aiheuttaisi erityistoimenpiteitä rakennushankkeen aikana. Rakennuksen vaipan yli vaikuttava lämpötilaero otettiin huomioon ulkovaippaan rajoittuvien kylmäsiltojen osana tarkastelemalla niitä kesä- ja talviolosuhteissa.

Tulokseksi saatuja lämpötilajakaumia käytettiin tarkasteltaessa kosteuden kondensoitumisen mahdollisuutta rakenteiden pinnalle. Kosteuden kondensoitumisen tarkastelu toteutettiin käsinlaskentamenetelmin. Liitoksiin, joiden kohdalla laskentatarkastelun tulos osoitti kosteuden tiivistyvän rakenteisiin, tehtiin suunnitelma liitoksen lisäeristämisestä. Tyypillinen ratkaisu oli lisätä ylimääräinen lämmöneristekerros rakenteen sisäpintaan kylmän tilan puolelle. Tarkastelun lopputuloksena saatiin varmistus tilojen välisten liitosten kosteusteknisestä toimivuudesta, liitoksiin kylmälle puolelle lisättävän lämmöneristekerroksen dimensiot sekä lämpimän kondensoivan tilan puolelle lisättävän ”kondenssieristeen” (lämmöneristekerroksen) dimensiot.

Kohteen väliseinien ilmatiiveyteen täytyi myös kiinnittää erityistä huomiota. Koska rakennuksen väliseinien yli on suuria lämpötila- ja kosteuspitoisuuseroja, siirtyisi mahdollisen ilmavuodon mukana suuria määriä kosteutta viereisiin tiloihin, joissa se aiheuttaisi runsasta kondensoitumista.

1. Johdanto

Rakennuksessa, jossa on useita eri lämpötiloissa olevia tiloja kuten lämmin toimisto-osa, kylmä- ja pakkasvarastoja, muodostuu kantavista rakenteista paljon rakennuksen sisäisiä kylmäsiltoja. Kylmävarastojen ilman suhteellinen kosteus on yleisesti hyvin suuri, jolloin vähänkin tilan normaalia lämpötilaa kylmemmät pinnat voivat aiheuttaa kondenssia. Koska sisätilojen lämpöolosuhteet ovat vakiot, voivat rakennuksen sisäiset kylmäsiltojen aiheuttaa pahimmillaan rakennuksen sisätiloihin jäänmuodostumista tai niin suurta kondenssia, ettei ilmanvaihto riitä poistamaan kylmäsiltojen alueelle muodostuvaa kosteutta.

Kohteen kylmäsiltojen kondenssi pyrittiin estämään lämmöneristämällä rakennuksessa olevien erilämpöisten tilojen kylmäsiltoina toimiva kantava rakenne kylmemmän tilan puolelta, jotta väliseinän lävistävän rakenteen pintalämpötila olisi lämpimämmän tilan puolella kondenssirajan yläpuolella. Jos kylmemmän tilan puolen lämmöneristys ei yksistään riittänyt kondenssiriskin poistamiseksi, laskettiin lämpimämmän tilan puolelle tarvittava kondenssieristys. Kondenssieristykseen tehtävänä on estää lämpimän tilan ilmankosteuden pääsy kosketuksiin kylmäsiltojen kylmien pintoihin.

Rakennuksen ulkovaippaan rajoittuvat rakennuksen sisäiset kylmäsiltojen tarkasteltiin ulkoilman

kesä- ja talviolosuhteissa, koska tällaisten rakennuksen sisäisten kylmäsiltojen lämpötilat olivat pienemmät talviolosuhteissa.

2. Liitosten lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden arviointi laskennallisesti

2.1 Tutkimustapa

Tutkimus toteutettiin suorittamalla tarkastettavista liitoksista numeerinen laskenta stationääritilassa rakenteen lämpökentän ratkaisemiseksi. Numeerisesta laskennasta saatujen tulosten perusteella arvioitiin kondensoitumisen mahdollisuutta rakenneosien pinnoille. Kondensoitumisen mahdollisuutta tarkasteltiin iteratiivisesti niin, että lämmöneristettä lisättiin eripuolille tarkasteltavaa rakennetta ja malli ratkaistiin uudelleen, kunnes kosteuden kondensoimista ei enää havaittu.

2.2 Tarkasteltavat liittymät/laskentageometria

Rakennus oli suuri kylmä- pakkasvarasto, jossa sijaitsee myös lämpimiä tiloja, kuten toimisto ja sosiaalitylöitä. Rakennuksen ulko- ja väliseinärakenteet olivat pelti-polyuretaani-pelti, sekä pelti-villa-pelti elementtejä. Yläpohjarakenteen kantavina rakenteina toimivat teräsbetoniset TT-laatat ja I-palkkisto. TT-laataston päällä sijaitsi eristekerros ja vedeneriste. Alapohjarakenteena kohteessa oli maanvarainen lämmöneristetty teräsbetonilaatta. Maan jäätyminen estämiseksi pakkasvarastojen alapohjaan asennettiin lämmityskaapelit

Kaikki liitokset, joissa ilmeni suuri lämpötila- tai kosteusero rakenteen yli, ja jotka sisälsivät rakenneosan, joka kulki tilasta toiseen toimien kylmäsiltoina, tarkastettiin laskennallisesti. Tarkasteltaviin liittymiin lukeutui:

- vierekkäisten tilojen ja yläpohjarakenteen liittymiä
- päällekkäisten tilojen ja välipohjan liittymiä
- vierekkäisten tilojen ja ulkoseinän liittymiä.

Liittymissä kylmäsiltoina toimivia rakenneosia olivat esim:

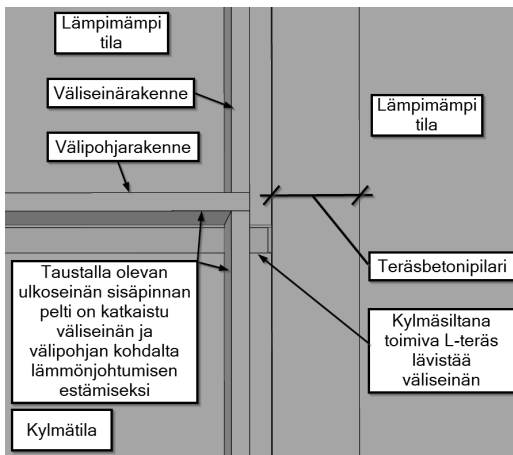
- TT-laatta, jatkuessaan katkeamattomana tilasta toiseen
- teräsbetoninen I-palkki
- välipohjan/alaslasketun katon kannakointiin tarkoitettu L-teräs
- sprinklerilaitteisto
- rakennuksen vaipparakenteena käytetyn pelti-polyuretaani-pelti elementin sisätilojen puoleinen pelti
- teräsbetonipilari.

Suuri osa tarkastetuista liittymistä jouduttiin lämmöneristämään kylmätilan puolelta kylmäsiltojen vaikutuksen heikentämiseksi, minkä lisäksi osa jouduttiin kondenssieristämään lämpimämmän tilan puolelta.

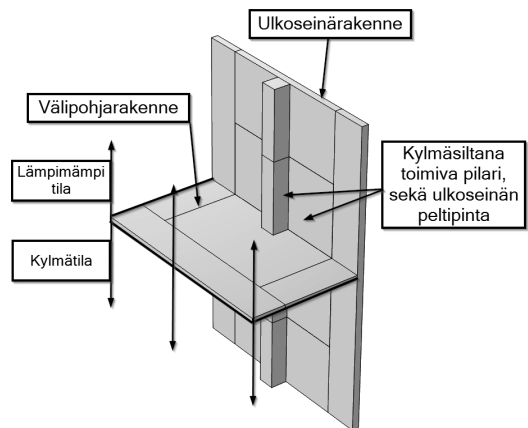
Tässä artikkelissa tarkastellaan kahta liittymää, joista ensimmäinen on ulkoseinän ja väliseinän liittymä, jossa väliseinän toisella puolella sijaitsee kylmätila ja toisella lämpimämpi varastotila. Väliseinän lävistää ulkoseinänlinjalla kulkeva L-teräs kulkien kylmätilasta varastotilaan. Ensimmäisen liittymän laskentageometria on esitetty kuvassa 1. Toinen tarkasteltava liittymä on välipohjaliittymä, jossa teräsbetonipilari jatkuu kylmätilasta yläpuoleisen lämpimämmän tilan puolelle. Ulkoseinäelementin sisäpinnasta jäi pilarin takaa välipohjan kohdalla poistamatta kapea peltikaistale, jolloin teräsbetonipilarin lisäksi myös ulkoseinäelementin peltinen pinta jatkuu sisätilan puoleisella pinnalla pilarin takana yhtenäisenä kylmätilasta ylempään lämpimään tilaan

ja toimii näin kylmäsiltaan. Muualta ulkoseinän pinnan pelti on katkaistu välipohjan ja väliseinän kohdalta ja näin lämmönjohtuminen peltiä pitkin tilasta toiseen on estetty. Toisen tarkasteltavan liittymän laskentageometria on esitetty kuvassa 2.

Laskentageometrioita muutettiin laskentatarkastelujen aikana lämmöneristeen lisäämisen muodossa. Laskenta suoritettiin kylmän tilan puolelta lisäeristämättömällä geometrialla, kahdella lämmöneristepaksuudella (50 mm ja 100 mm), sekä tarvittaessa lämpimältä puolelta kondenssieristetyllä geometrialla.



Kuva 1. Väliseinän lävistävän L-teräksen kylmäsiltaa tarkastelun laskentageometria.



Kuva 2. Teräsbetonipilarin ja ulkoseinän peltipinnan kylmäsiltaa tarkastelun laskentageometria.

2.3 Laskennan reunaehdot

Laskennan reunaehtoina käytettiin IV-suunnittelijalta saatuja sisäilman olosuhteiden arvoja. Ulkoilmaan rajoittuvissa liittymissä käytettiin reunaehtona myös ulkoilman lämpötilaa. Tässä artikkelissa esitettyjen tarkastelujen sisä- ja ulkoilman olosuhteet on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Lämpötila- ja kosteuserot rakenteen yli.

	Sisätila 1	Sisätila 2	Ulkoilma
Lämpötila [°C]	+2..4	-22	-25/+25
Kosteus [RH-%]	90	50	-

Lämmönsiirto rakenteiden ja ympäröivien tilojen välillä mallinnettiin konvektiivisena lämmönsiirtona. Rakenteiden sisäinen lämmönsiirto mallinnettiin lämmön johtumisena. Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksina käytettiin lämmöneristeiden osalta materiaalitoimittajien antamia arvoja. Muiden materiaalien osalta käytettiin laskentaohjelman materiaalikirjaston arvoja. Rakennuksessa olevat avoimet varastohyllyt eivät peitä seinäpintoja. Pintojen konvektiivisina lämmönsiirtokertoimina käytettiin Taulukon 2 arvoja.

Taulukko 2. Pintojen konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet [1].

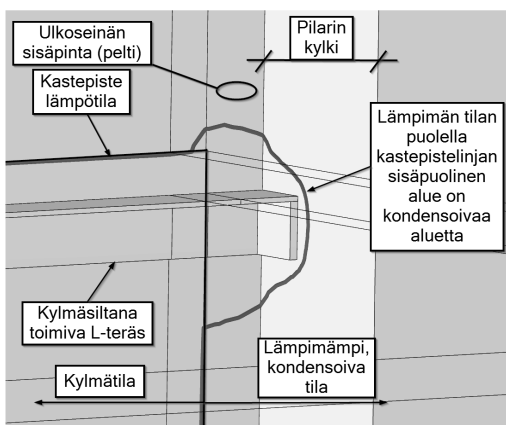
Pinnan lämmönsiirtokerroin [W/m ² K]	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
Sisätilat	10	7,7	5,88
Ulkoilman puoli	25	25	25

3. Laskentatulokset

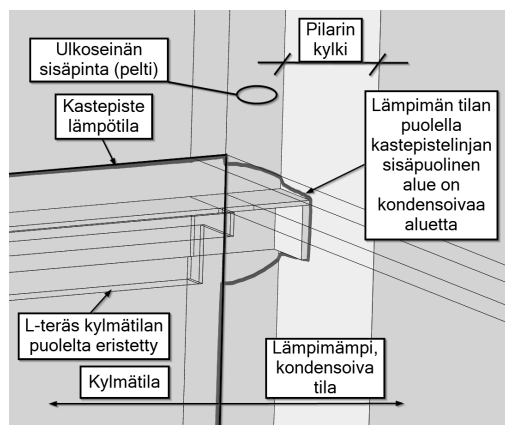
Numeerisesta laskennasta saatuja laskentatuloksia arvioitiin aikaisemmin saatujen sisäilman olosuhteiden perusteella niin, että rakenteen yli mallinnettiin kastepistelämpötilaa kuvaava isoterminen linja sekä pinta, joiden sijaintia rakenteessa manipuloitiin lisäämällä ensin eristettä liittymän kylmälle puolelle. Mikäli sisäilman kanssa kosketuksissa olevan rakenneosan pintalämpötila edelleen laski alle kastepistelämpötilan, lisättiin myös liittymän lämpimälle puolelle diffuusiotiivis lämmöneriste, jolla kylmä rakenne erotettiin sisäilmasta. Laskentamallit ratkaistiin eristeiden lisäämisen jälkeen aina uudestaan, kunnes rakenteiden pintalämpötilat eivät enää laskeneet alle kastepistelämpötilan. IV-suunnittelijan määrittämällä sisäilman olosuhteilla saatiin kastepistelämpötilaksi artikkelissa tarkasteltavien liittymien kohdalla $2,51\text{ °C}$.

3.1 Väliseinän lävistävän L-teräksen kylmäsilta-tarkastelun tulokset

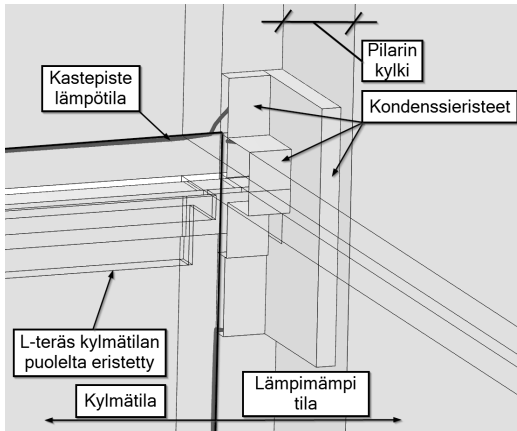
Ensimmäisen liittymän laskentamalli ratkaistiin ensin täysin lisäeristämättömänä, jolloin L-teräksen huomattiin toimivan erittäin voimakkaana kylmäsilta viilentäen lämpimämmän varastotilan ($T = +2..4\text{ °C}$) ulkoseinän sisäpinnan pellin, sekä teräsbetonipilarin pinnan lämpötilan alle kastepistelämpötilan (kuva 3). Seuraavaksi laskentamallia muutettiin niin, että L-teräs eristettiin kylmätilan puolelta polyuretaanieristeellä. Malli ratkaistiin yhä uudestaan, kunnes löydettiin eristeen pituudelle ja paksuudelle raja-arvo, jonka yli mentäessä ei rakenteen lämpökentässä havaittaisi enää merkittävää muutosta. Vaikka rakenteen lämmönvastusta kasvatettiin lisäämällä lämmöneristettä kylmätilaan L-teräksen ympärille, laski lämpimän tilan puolella seinän ja pilarin pintalämpötilat edelleen alle kastepistelämpötilan (kuva 4). Seuraavana ja viimeisenä toimenpiteenä mitoitettiin lämpimämmän varastotilan puolelle kondenssieristys alueille, joissa lämpötila laski alle kastepistelämpötilan. Kondenssieristeellä erotettiin kosteutta sisältävä sisäilma kylmistä rakenteista ja näin estettiin kosteuden tiivistyminen. Kondenssieristeen mitoituksessa huomattiin, että lämpimämmän tilan puolelta eristettäessä rakenteen lämpötila laski entisestään lämpövirran heikentyessä. Kastepistelämpötilan jakautuminen rakenteessa, jossa kylmäsilta toimiva rakenneosa on eristetty kylmätilan puolelta ja kondensoivat pinnat on eristetty kondenssieristeellä, on esitetty kuvissa 5 ja 6.



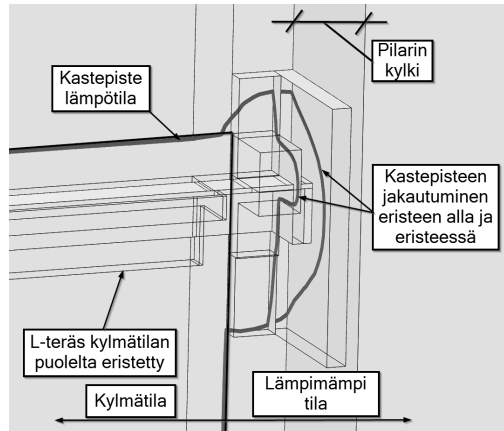
Kuva 3. Kastepisteen ($2,51\text{ °C}$) jakautuminen eristämättömässä rakenteessa.



Kuva 4. Kastepisteen ($2,51\text{ °C}$) jakautuminen kylmätilan puolelta eristetyssä rakenteessa.



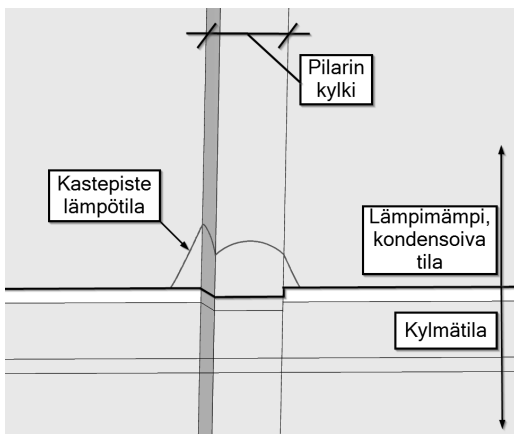
Kuva 5. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen rakenteessa, joka on eristetty kylmätilan puolelta, sekä kondenssieristetty lämpimämmän tilan puolelta.



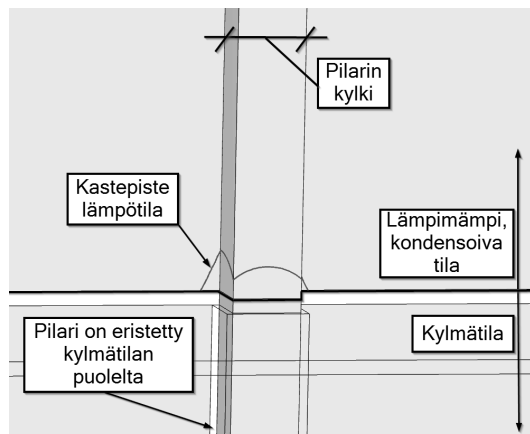
Kuva 6. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen rakenteessa, joka on eristetty kylmätilan puolelta, sekä kondenssieristetty lämpimämmän tilan puolelta. Kuvan mallista on eristeiden pinnat poistettu, jotta nähdään kastepisteen jakautuminen eristeen alla ja eristeessä.

3.2 Teräsbetonipilarin ja ulkoseinän peltipinnan kylmäsilta tarkastelun tulokset

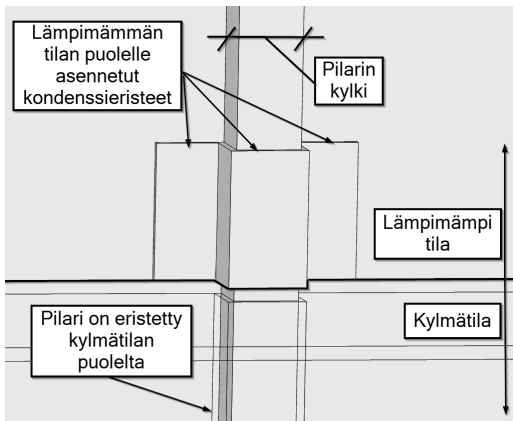
Toisen liittymän tarkastelun kulku vastasi ensimmäistä. Ensin ratkaistiin malli ilman lisäeristystä, jonka jälkeen kylmätilan puolelta eristettynä, ja lopuksi lisättiin lämpimämmän tilan puolelle kondenssieriste ja ratkaistiin malli uudestaan. Ilman lisäeristettä ratkaistu laskentamalli on esitetty kuvassa 7. Laskentamalli, jossa kylmäsilta toimiva rakenne on lämmöneristetty kylmätilan puolelta, on esitetty kuvassa 8 ja vastaavasti kylmätilanpuolelta sekä lämpimämmän tilan puolelta kondenssieristetyn laskentamallin tulokset on esitetty kuvissa 9 ja 10.



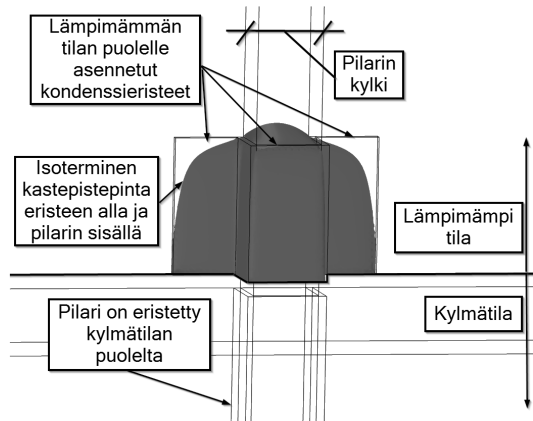
Kuva 7. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen eristämättömässä rakenteessa.



Kuva 8. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen kylmätilan puolelta eristetyssä rakenteessa.



Kuva 9. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen rakenteessa, joka on eristetty kylmätilan puolelta, sekä kondenssieristetty lämpimämmän tilan puolelta.



Kuva 10. Kastepisteen ($2,51\text{ }^{\circ}\text{C}$) jakautuminen rakenteessa, joka on eristetty kylmätilan puolelta, sekä kondenssieristetty lämpimämmän tilan puolelta. Kuvan mallista on eristeiden pinnat poistettu, jotta nähdään kastepisteen jakautuminen eristeen alla ja eristeessä.

4. Yhteenveto

Kylmätiloja suunniteltaessa on erityisen tärkeää suorittaa kosteusteknisesti kriittisille liittymille laskennallinen kylmäsilta tarkastelu.

Kondenssieristykseen tarkoitus on estää ilman kosteuden pääsy kylmälle pinnalle, joten sen vesihöyryvastuksen tulee olla suuri tai se tulee pinnoittaa vesihöyrytiivillä materiaalilla. Kondenssieristeen mitoituksessa on myös tärkeää ottaa huomioon, että rakenteen kondenssieristäminen lämpimällä puolella heikentää lämpövirtaa rakenteeseen laajentaen kondensoivaa aluetta. Toisaalta kondenssieristeen paksuuden on oltava kuitenkin riittävän paksu, ettei kondenssieristeen pinnan lämpötila laske kondensoivalle alueelle.

Yläpohja- ja ulkoseinä rakenteeseen liittyviä liitoksia tarkastellessa huomattiin talviolosuhteiden olevan laskennan kannalta määräviä. Tilojen kosteuspitoisuus oli ilmanvaihtosuunnittelijan toimesta ilmoitettu olevan ajasta riippumaton vakio, minkä seurauksena sisäilman kosteuspitoisuutta käsiteltiin laskennoissa myös ajasta riippumattomana arvona. Tämän seurauksena sisäilman kosteuspitoisuus ei talvella laskenut ulkoilman kosteussisällön laskiessa. Ulkoilman matala lämpötila alensi koko rakenteen lämpötilaa voimistaen näin kylmäsiltojen vaikutusta.

Tiivistys suoritettiin teippaamalla kaikki saumat ja liittymät huolellisesti molemmilta puolilta, mutta erityistä huomiota kiinnitettiin niiden rakenteiden lämpimämpään puoleen, joissa oli suuri lämpötilaero. Työmaalla kokeiltiin useamman eri teipin tartunta- ja asennettavuusominaisuuksia ja päädyttiin sitten yhden valmistajan butyyliteippeihin. Elementtien saumakohdissa ja muissa pienissä erityiskohdissa, joissa teippi ei kyennyt tiivistämään luotettavasti, käytettiin lisäksi butyyliitiivistysmassaa.

Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. Suomen Standardisoimisliitto

A3. Rakenteiden ja rakennusten lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arviointi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittausten sekä niistä koottavan tietokannan avulla

Anssi Laukkarinen¹, Pauli Sekki^{1,2}, Antti Mikkonen¹ ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

² Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Tässä keskustelupaperissa käydään läpi rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisten ja pitkäkestoisten kenttämittausten nykyistä laajempaan käyttöön liittyviä mahdollisuuksia ja vaatimuksia. Rakenteissa esiintyvien lämpötilan ja suhteellisen kosteuden olosuhteiden avulla olisi mahdollista rakentaa yhtenäinen ketju suunnitteluvaiheen tavoitteista niiden täyttymisen seuraamiseen rakennuksen käytön aikana. Erityisesti mittauksista olisi hyötyä pohdittaessa rajanvetoa hyväksytyille rakenneratkaisuille sekä tuotettaessa tietoa rakenteiden todellisesta käyttäytymisestä. Mittausdatojen kokoaminen rakennusalan yhteiseksi avoimen datan tietopankiksi toisi uusia mahdollisuuksia rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden määrittelyyn kansallisella tasolla sekä yksittäisten kohteiden arviointiin suhteessa muihin saman rakenneratkaisun kohteisiin.

1. Johdanto

Lämpötila (T) ja suhteellinen kosteus (RH) ovat tärkeitä suureita rakennusfysiikassa, koska ne vaikuttavat keskeisellä tavalla useiden vaurioitumisilmiöiden käynnistymiseen ja etenemiseen. Hyvin toimivassa rakenteessa lämpö- ja kosteusolosuhteet pysyvät sellaisina, että rakenne täyttää sille asetetut toimivuusvaatimukset tavoitellun käyttöiän ajan.

Rakentamismääräyksien lähtökohta on, että rakenteiden tulee olla lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia [1]. Rakenteiden kosteustekniselle toimivuudelle ei kuitenkaan ole tällä hetkellä yksikäsitteistä määritelmää, minkä seurauksena tulkinnat yksittäisen rakenneratkaisun lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnan hyväksyttävyydestä voivat vaihdella. Osittain tämä on seurausta siitä, että rakenteiden toimivuuden eri arviointimenetelmät (kokemusperäisesti, laskennallisesti, mittauksin) eivät muodosta yhtenäistä jatkumoa, jossa suunnitteluvaiheessa asetettujen tavoitteiden saavuttaminen voitaisiin yksiselitteisesti todentaa valmistuneesta rakennuksesta. Tämän lisäksi eri hankkeissa koottuja aineistoja ei useinkaan koota yhteen, jolloin kerätyn datan potentiaali jää osittain hyödyntämättä.

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia tehdään nykyisin esimerkiksi betonirakenteiden kuivumisen ja päällystettävyyden arvioimiseksi [2], talotekniikan laadunvarmistusta ja vastaanottoa varten [3], sisäilmaston tavoitetasojen saavuttamisen todentamiseksi [4] sekä kuntotutkimusten osana rakennuksen ja rakenteiden toimivuuden arvioimiseksi [5, luku 7]. Rakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteiden jatkuvatoimista seuranta voidaan myös tehdä rakennusten ylläpidon osana [6, luku 6.4.3]. Jatkuvatoimisia T/RH-mittauksia tehdään myös erilaisten tutkimus- ja kehityshankkeiden osana Suomessa ja ulkomailla.

Edellä olevien esimerkkien perusteella talonrakentamisessa tehdään paljon erilaisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia eri tarkoituksiin. Näiden esimerkkien ja yleisen käsityksen

perusteella rakenteista tehtävien pitkäkestoisten ja jatkuvatoimisten T/RH-mittausten osuus kaikista mittauksista on kuitenkin melko pieni. Rakenteiden T/RH-olosuhteet tarjoavat kuitenkin keinon määrittää rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden tavoitetasot laskennallisesti rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja todentaa niiden saavuttaminen kussakin kohteessa käyttövaiheen aikana. Yksittäisistä kohteista tehtävien mittausten lisäksi näitä aineistoja tulisi kuitenkin koota yhteen paikkaan ja asettaa avoimesti saataville, jotta rakennusalan eri toimijat voisivat hyödyntää niitä eri tarkoituksiin.

Rakenteiden kenttämittauksia ajatellaan tässä yhteydessä hyödynnettävän erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa kenttämittauksilla voitaisiin saada lisää tietoa rakenteiden käyttäytymisestä. Tällaisia ovat esimerkiksi yleisesti hyvin toimivaksi arvioitujen tai selkeästi puutteellisesti toimivien rakenteiden mittaukset referenssiaineiston muodostamiseksi; nykyisen ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteiden suhteen hyväksyttävyyden rajalla olevien rakenteiden mittaukset; korjauskohteissa nykytietämyksen valossa puutteellisten rakenneratkaisujen mittaukset, jotka yksittäisissä kohteissa ovat kuitenkin toimineet hyväksyttävästi; uusien rakenneratkaisujen mittaukset erilaisten rakenteellisten ratkaisujen vaikutusten arvioimiseksi.

Tämän artikkelin yleisenä tavoitteena on toimia keskustelupaperina sille, miten rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden pitkäkestoisia ja jatkuvatoimisia kenttämittauksia voitaisiin nykyistä paremmin hyödyntää rakenteiden toimivuuden tavoitteenasettelussa ja todentamisessa. Muut mittaukset on rajattu käsittelyn ulkopuolelle. Kirjoituksen tavoitteet tarkemmin ovat:

- i. Hahmotella keinoja asettaa rakenneratkaisulle lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tavoitteet siten, että ne ovat todennettavissa kohdekohtaisilla mittauksilla (luku 2)
- ii. Hahmotella askelmerkkejä uudelle rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden tietokannalle, johon koottaisiin laaja ja kasvava otos pitkäkestoisia ja jatkuvatoimisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittauksia (luku 3).

Kirjoitus pohjautuu kokemuksiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä toteutetuista projekteista [9, 10, 11, 12], muuhun alan kirjallisuuteen (viitattu erikseen) sekä artikkelin ykköskirjoittajan väitöskirjaprojektiin. Artikkelissa tarkastellaan rakenteita, joissa jatkuvatoimisilla mittauksilla saadaan enemmän tietoa verrattuna kertaluonteisiin tai jaksottain luettaviin mittauksiin.

2. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittausten hyödyntäminen rakenteen toimivuuden tavoitteenasettelussa ja todentamisessa

2.1 Tavoitteiden asettaminen

Lähtökohtana nyt käsiteltävässä menettelyssä on, että tavoitteet rakenneratkaisun lämpö- ja kosteustekniselle toimivuudelle asetetaan suoraan T/RH-arvojen tai näistä laskettujen toimivuussuureiden avulla. Tällöin tavoitteiden saavuttaminen pystytään tekemään suoraan kohdekohtaisilla T/RH-mittauksilla ja tulosten analysoinnilla.

T/RH-arvoihin perustuvat tavoitteet on mahdollista määritellä useilla eri tavoilla. Muutamia esimerkkejä on esitetty taulukossa 1. Taulukossa esitettyihin ehtoihin liittyvät raja-arvot on mahdollista asettaa eri vaurioitumistapoja kuvaavien mallien avulla, mutta myös tekemällä eri rakenneratkaisuista kuntotutkimuksia riittävän laajalla otoksella (kts. luku 3).

Osa T/RH-mittauksiin perustuvaa tavoitteenasettelu- ja todentamismenettelyä on myös

arviointipisteiden lukumäärän ja laajuuden määrittäminen. Arviointipisteellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kohtaa rakenteessa, jolle T/RH-arvoihin perustuvat tavoitteet asetetaan ja joiden täytyminen todennetaan myöhemmin mittauksin. Rakenneosan ilmansuunta, rakenneratkaisu itsessään, korkeusasema maanpinnasta ja huonetilan lattiasta, muun rakenneosan tai -yksityiskohdan läheisyys sekä kohdan lämpötila- ja kosteushistoria vaikuttavat kaikki muodostuviin olosuhteisiin. Koska rakentamismääräystenkin lähtökohtana on, että rakenteiden tulee olla lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia, tulee arviointipisteiden valinnan osua mitoittaviin rakennejärjestelmän kohtiin. Jos mitoittavien pisteiden sijainnista ei ole täyttä varmuutta, niin tällöin arviointipisteitä tulee ottaa mukaan siinä laajuudessa, että mitoittavat pisteet sisältyvät tähän joukkoon suurella todennäköisyydellä. Tällöin arviointipisteiden valinta palautuu normaaliin rakennejärjestelmän rasiustekijöiden ja kestävyuden arviointiin.

Taulukko 1. Eri tapoja asettaa rakenteelle T/RH-olosuhteisiin perustuvia toimivuusvaatimuksia.

id	Ehto	Kommenteja
i	$RH < RH_{max}$	Yksinkertainen tarkistaa, mutta vakiosuuruinen yläraja ei ota huomioon eri vaurioitumistapojen yksityiskohtia. Esimerkkejä: i) Suhteellisen kosteuden tulee olla jatkuvasti alle 80 % RH, ii) Suhteellisen kosteuden tulee olla 99 % ajasta alle 85 % RH. Molempia ehtoja voidaan visualisoida RH-aika -viivakuvaajien lisäksi myös RH:n kertymäfunktioiden avulla.
ii	$RH < RH_{crit}(T)$	Myös melko yksinkertainen tarkistaa, minkä lisäksi olosuhteita voidaan visualisoida T-RH -pistekuvaajalla. Kriittisen RH:n funktiossa voidaan ottaa samalla kertaa huomioon homeen kasvu [13] ja kosteuden kondensoituminen (kommentti alla). Esimerkki: $RH_{crit} = \begin{cases} 0,83T + 97 & , T \leq 0 \\ \min \left(\max \left(\begin{matrix} -0,00267T^3 \\ +0,16T^2 \\ -3,13T + 100 \end{matrix} , 80 \right) , 97 \right) & , \text{muutoin} \end{cases}$ Pakkasen puolella olevissa arvoissa on otettu huomioon, että RH-anturit ilmoittavat lukeman yleensä nestemäisen veden suhteen myös < 0 °C lämpötilassa.
iii	$\Delta t = \sum_{j=1}^N \Delta t_j$ [jos $RH_j > RH_{crit}$]	Niiden ajanjaksojen yhteenlaskettu kesto, kun olosuhdetavoitteet eivät täyty. Voidaan laskea myös prosenttiosuutena mittausten kestoista.
iv	$M_{max}(T, RH) < 1$	Mitatuista T/RH-arvoista rajapinnan herkimmälle materiaalille laskettu suomalaisen homeindeksin maksimiarvo, jonka tulee pysyä alle ykkösen (ei homeen kasvua). Sallivampi ehto edellisiin verrattuna, mutta tulosten arviointiin tulee mukaan enemmän homeen kasvun mallintamiseen liittyviä epävarmuuksia.
v	$(v - v_u) \approx 0$ ja $(T - T_u) > \Delta T(T)$	Mittauspisteessä ei ole juurikaan kosteuslisää ulkoilmaan nähden, mutta mittauspiste on tavoitellun verran ulkoilmaa lämpimämpi.
vi	$VI = \frac{v - v_u}{v_s - v_u} < VI_{max}$ ja $TI = \frac{T - T_u}{T_s - T_u} > TI_{min}$	Perusidea kuten edellä, mutta vesihöyrypitoisuus- ja lämpötilaerot on normeerattu sisä- ja ulkoilman olosuhteiden välisten erotusten avulla. Jos toinen tai molemmat nimittäjistä ovat lähellä nolaa, tulee tilanteet käsitellä erikseen esimerkiksi kohdan v) avulla.
vii	$I(T_{ref}, RH_{ref}) < I_{max}$, kun $T_{ref}, RH_{ref} = f(T, RH)$	Mitatut T/RH-olosuhteet normeerataan ensin rakennusfysiikaalisen testivuoden mukaisiin referenssiolosuhteisiin (<i>ref</i>), ennen kuin niistä lasketaan vertailuun käytettävät toimivuussuureet <i>I</i> .

Tietyn rakenteen tai pisteen erityispiirteet voivat tehdä kyseisestä kohdasta T/RH-mittauksia ajatellen erityisen kiinnostavan tai toisaalta tehdä mittaukset kyseisestä kohdasta tarpeettomiksi. Jos suhteellisen kosteuden tiedetään olevan pysyvästi tietyssä pisteessä hyvin korkea (> 90...95 % RH), ei mittausepävarmuuksien vuoksi tältä alueelta tehtävistä jatkuvatoimisista mittauksista saada juuri lisätietoa tähän ennakkotietoon nähden. Tällöin voi kuitenkin olla perusteltua tehdä

lämpötilamittauksia rakennejärjestelmän suunnitelmienmukaisen toiminnan todentamiseksi. Jos suhteellisen kosteuden tasosta ei ole tarkkaa käsitystä etukäteen, tällöin korkealla RH-alueella tehtävien mittausten perusteella voidaan saada selville suhteellisen kosteuden suuruusluokka. Hitaasti kuivuvien rakenteiden olosuhteet muuttuvat ajan funktiona, jolloin niiden kuivumisen seuranta on perusteltua. Pysyvästi matalan RH-alueen pisteitä ei ole tarpeen seurata vaurioitumisen seuraamiseksi, mutta tällaiset mittaukset voivat kuitenkin mahdollistaa esimerkiksi lämpötila- ja vesihöyrypitoisuusprofiilien sekä -erojen määrittämisen rakenteen yli ja olla siten hyödyllisiä rakenteen käyttäytymisen havainnollistamiseksi.

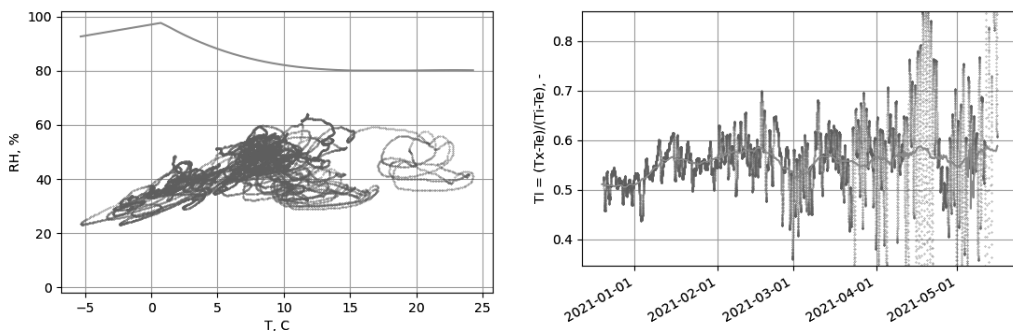
Joskus mittausprojektiin päätyminen jälkeen mittauspisteiden määrän kasvattaminen voi olla siinä määrin helppoa ja edullista, että lisämittauksia halutaan ottaa mukaan varmuuden vuoksi. Tällöin ohjaavia strategioita lisäpisteiden valintaan voivat olla:

- a) yksittäisten mittauspisteiden tuplaaminen, jolla varaudutaan laiterikkoihin
- b) samankaltaisten mittauspisteiden ottaminen mukaan, jolla saadaan lisätietoa olosuhteiden vaihtelusta samankaltaisten mittauspisteiden kesken ja voidaan laskea laajempaa geometrista aluetta kuvaavat keskiarvo-olosuhteet, tai
- c) poikkeavien mittauspisteiden mukaanotto, jolla pyritään tuottamaan tulosaineistoon lisää referenssipisteitä tulosdatan tulkintamahdollisuuksien laajentamiseksi.

Ilmastonmuutokseen varautuminen on mahdollista toteuttaa asettamalla toimivuusvaatimukset siten, että niissä on ylimääräistä varmuutta nykyilmaston olosuhteissa, mutta että vaatimusten arvioidaan täyttyvän myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Asetetut tavoitteet ja niihin liittyvät todentamismenettelyt tulee dokumentoida.

2.2 Toteutumisen todentaminen

Yksinkertaisimmillaan toteutumisen todentaminen tarkoittaa hyvin lyhyttä vertailua. Jos esimerkiksi toimivuusvaatimus tietylle arviointipisteelle on asetettu taulukon 1, kohdan (i) mukaisesti, tällöin mitattua suhteellista kosteutta verrataan tähän rajaan ja mitattujen RH-arvojen tulee jäädä sen alle. Kuvassa 1 on esimerkki erään ulkoseinärakenteen mittauksista hyödyntäen taulukon 1 tapoja ii ja vi (TI:n osalta).



Kuva 1. Erään ulkoseinärakenteen mittauksia. Olosuhteet seinässä olivat mittausjaksolla rakennusfysiikallisesti hyvällä tasolla. Vasen kuva: RH:lle asetettu maksimitaso ja toteuma. Oikea kuva: Lämpötilaindeksin tuntiarvot ja niiden liukuva keskiarvo.

Mittauksien arviointiin liittyy kuitenkin myös tiettyjä ehtoja, joiden tulee toteutua tulosten luotettavuuden varmistamiseksi ja parantamiseksi sekä erityistilanteisiin liittyvien kysymysten

ratkaisemiseksi. Osa näistä on kaikkiin mittauksiin liittyviä teknisiä ja prosessiluonteisia kysymyksiä, kuten tarkoitukseen sopivien ja kalibroitujen mittalaitteiden käyttö, oikea asennustapa, prosessissa mukana olevien henkilöiden riittävä osaaminen sekä toiminnan suunnitelmallisuus ja avoimuus. Näihin liittyvää ohjeistusta on löydettävissä alan kirjallisuudesta, eikä niitä käydä tässä yhteydessä sen tarkemmin läpi. Osa taas on erityisesti nyt käsiteltävään menettelyyn liittyviä ja niistä käydään alla tarkemmin läpi mittausepävarmuuden roolia ja tarvittavaa mittausjakson pituutta.

Mittausepävarmuudet vaikeuttavat vahvojen tulkintojen tekemistä mittaustuloksista, mutta samalla laitteisiin ja niiden kalibrointeihin liittyvien epävarmuuksien tunteminen on myös etu verrattuna menetelmiin, joissa epävarmuuksia ei tunneta. Taulukossa 1 esitettyihin arvoihin ei ole merkattu näkyviin mittausepävarmuuksia, koska monimutkaisemmille menetelmille näitä ei tällä hetkellä tunneta. Mittausepävarmuuden käsittelyn ns. suorassa menetelmässä (*simple acceptance*) osapuolet voivat sopia erilaisista mittausepävarmuuden pienentämistoimenpiteistä, mutta mittausepävarmuutta ei kuitenkaan oteta erikseen huomioon vaatimustason täyttymistä arvioitaessa. Yksityiskohtaisempi tapa on määrittää mittaustuloksiin liittyvä standardiepävarmuus [14] ja tämän jälkeen asettamalla vaatimus, että mittaustulos on vähintään 1–2 standardiepävarmuuden verran vaatimusrajan varmalla puolella (*guarded acceptance*) [15].

Mittausepävarmuuden olemassaolo on hyvä muistaa myös kahden luvun vertailuissa, joissa erotuksen voidaan sanoa olevan merkityksellinen vasta siinä vaiheessa, kun se on erotuksen mittausepävarmuutta suurempi. Esimerkin vuoksi oletetaan, että olemme tehneet T/RH-mittauksia rakenteen lämpimältä ja kylmältä puolelta. Laiterikkoja varten rakenteen kylmemmälle puolelle on asennettu kaksi anturia ($N_2 = 2$) ja lämpimämmälle puolelle yksi anturi ($N_1 = 1$). Kylmällä puolella (ryhmä 2) olevien antureiden keskiarvo-olosuhteet ovat -5 °C ja 80 % RH sekä lämpimällä puolella (ryhmä 1) olevan anturin tulos 15 °C ja 25 % RH . Oletetaan anturit ja näihin liittyvät standardiepävarmuudet toisistaan riippumattomiksi ja keskenään samanlaisiksi ja että yksittäiseen mittalaitteeseen liittyvät yhdistetyt standardiepävarmuudet ovat: $u_2(T) = 0,5\text{ °C}$, $u_1(T) = 0,3\text{ °C}$, $u_2(\varphi) = 5\text{ % RH}$ ja $u_1(\varphi) = 3\text{ % RH}$.

Kun halutaan selvittää arviointipisteiden vesihöyrypitoisuuksien erotus, niin tämä saadaan laskettua anturiryhmien keskiarvojen erotuksena, eli: $\Delta v = \bar{v}_2 - \bar{v}_1 = 3,20\text{ g/m}^3 - 2,73\text{ g/m}^3 = 0,47\text{ g/m}^3$. Tähän tulokseen liittyvän standardiepävarmuuden lausekkeeksi voidaan johtaa: $u_c(\Delta v) = \sqrt{u^2(v_1)/N_1 + u^2(v_2)/N_2}$, jossa $u(v_1)$ on vesihöyrypitoisuuden standardiepävarmuus lämpimällä puolella olevaan ryhmään 1 kuuluvalla yksittäiselle anturille ja $u(v_2)$ vastaava arvo kylmällä puolella ryhmään 2 kuuluville yksittäisille antureille. Yksittäisen anturin standardiepävarmuus saadaan laskettua GUM-ohjeen sekä kyllästysvesihöyrypitoisuuden lausekkeen, ideaalikaasun tilanyhtälön, varianssien summalausekkeen ja Taylorin sarjakehitelmän avulla [12, 14].

Edellä mainittuja lähtötietoja ja menetelmiä käytettäessä yhden anturin tuloksista lasketun vesihöyrypitoisuuden standardiepävarmuus on kylmän puolen olosuhteille $u(v_1) = 0,17\text{ g/m}^3$ ja lämpimän puolen olosuhteille $u(v_2) = 0,38\text{ g/m}^3$. Vesihöyrypitoisuuseron yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi saadaan tällöin: $u_c(\Delta v) = (0,38^2 / 2 + 0,17^2 / 1)^{0,5} = 0,40\text{ g/m}^3$. Jos mittausepävarmuus oletetaan normaalijakautuneeksi ja että 95 % luottamusväliä vastaa kattavuuskerroin $k = 2$, niin tällöin vesihöyrypitoisuuseron 95 % luottamusväliä vastaava laajennettu mittausepävarmuus on: $U_{k=2} = 2 \cdot 0,40\text{ g/m}^3 = 0,80\text{ g/m}^3$. Tällöin mittausepävarmuuden näkökulmasta katsottuna arviointipisteiden välillä olisi nolasta poikkeava vesihöyrypitoisuusero kattavuuskerrointa $k = 1$ käytettäessä, mutta ei kerroin $k = 2$ käytettäessä. Normaalijakautuneille suureille nämä arvot vastaavat noin 68 % ja 95 % luottamusväläjä.

Tarvittavaa mittausjakson pituutta arvioitaessa lähtökohtana tulisi olla, että mittaustuloksissa on mukana otos kaikista rakenteeseen kohdistuvista olosuhteista. Tällä perusteella toimivuuden arviointi tulisi tehdä pitkäkestoisilla mittauksilla, koska olosuhteet rakenteen sisällä muuttuvat vuoden kierron ja vuorokauden ajan mukaan ja lyhytkestoiset mittaukset eivät anna edustavaa kuvaa mittauskohdan pitkäaikaisesta käyttäytymisestä. Tarkempien tietojen puuttuessa mittausjakson tulisi olla vähintään yksi vuosi, jotta tuloksissa olisi mukana vähintään yksi kesäkausi ja yksi talvikausi. Mittausdatan analysointimenetelmien kehittyessä mittausjakson vaadittua pituutta voi olla tulevaisuudessa mahdollista lyhentää.

Vaikka mittausjakso sisältäisi yhden kesä- ja yhden talvijakson, voivat peräkkäiset vuodet olla rakennusfysiikallisesti toisistaan hyvin erilaisia. Eri ajanjaksoina tehdyt mittaukset voivat osua mihin tahansa kohtaan vuosien kriittisyysjärjestyksestä, minkä seurauksena eri aikoina tehdyt mittaukset eivät automaattisesti ole keskenään vertailukelpoisia. Vuosien välisen vaihtelun huomioon ottamiseksi on olemassa ainakin seuraavat keinot:

- a) Mittauksia jatketaan niin pitkään, että asetettujen vaatimusten täyttyminen voidaan todeta suoraan raakadatasta
- b) Mittauksia jatketaan niin kauan, että mittausjaksoon tulee mukaan erilaisia vuosia. Mitattujen vuosien olosuhteita verrataan viimeisimpään 30 vuoden ilmastolliseen vertailukauteen ja tavanomaisten vuosien tapauksessa kaikkien mitattujen vuosien tulee täyttää asetetut tavoitteet.
- c) Mitatuille olosuhteille määritetään sellainen varmuusmarginaali, että päätös rakenteen toimivuudesta voidaan tehdä suoraan yhden vuoden mittausjaksosta
- d) Mittaustulosten analysointi tehdään käyttäen menetelmiä, jotka normeeraavat mittaustulokset rakennusfysiikallisen testivuoden olosuhteisiin. Vaadittu mittausjakson pituus riippuu tällöin normeeraamisen menetellyn ominaisuuksista.

Edellä olevissa kohdissa sisäilman olosuhteiden vaihtelun vaikutukset oletetaan tulevan otetuiksi huomioon ulkoilman olosuhteiden vaihtelun osana.

3. Pitkäkestoisten T/RH-mittausten tietokannan muodostaminen

3.1 Laajaan otokseen perustuva rakenneratkaisun hyväksymismenettely

Rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden pitkäkestoisia mittauksia on tehty Suomessa useita vuosikymmeniä. Osa näistä mittaustuloksista on jo ennestään raportoitu julkisesti erilaisten tutkimushankkeiden, opinnäytetöiden ja kehitysprojektien osana, mutta niihin liittyviä aikasarjoja ei useinkaan ole sähköisesti vapaasti saatavilla. Lisäksi eri tahoilla voi olla rakenteiden T/RH-mittausten aikasarjoja, joita ei ole aikaisemmin julkaistu oman organisaation ulkopuolelle, mutta joiden julkaisemiselle ei sinällään olisi periaatteellista estettä. Nämä aineistot muodostavat olemassa olevan ja arvokkaan tietomäärän, joka tulisi pyrkiä kokoamaan avoimeksi tietokannaksi jatkohyödyntämistä varten. Erilaisista avoimen datan tietokannoista on olemassa muilta aloilta useita esimerkkejä, mikä lisäksi avoimen datan keräämiseen, tallentamiseen ja hallinnointiin on nykyisin saatavissa apua ja valmiita ratkaisuja esimerkiksi yliopistojen ja tieteen tietotekniikan keskuksen CSC:n kautta. Lisätietoja avoimesta datasta löytyy esimerkiksi osoitteesta: www.avoindata.fi [16].

Yksi pitkien T/RH-aikasarjojen tietokannan soveltamiskohteista liittyy edellisen luvun mukaiseen ajatukseen rakenneratkaisun tavoitteiden asettamisesta suoraan T/RH-mittausdatan avulla. Laajan

tietokannan avulla pystyttäisiin määrittämään eri rakenneratkaisujen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta kuvaavien suureiden jakauma, jonka jälkeen näitä toteutuneita arvoja verrattaisiin koko rakennuskantaa koskeviin tavoitteisiin. Ilmastonmuutokseen varautuminen pystyttäisiin toteuttamaan joko varaamalla mittaustuloksiin eri päästökkenaarioiden mukainen riittävä varmuus tai käyttämällä mitattuja T/RH-olosuhteita referenssinä laskentatulosten riittävän tarkkuuden varmistamiselle (vrt. [7, 8]). Aineistojen määrän kasvaessa muodostuisi listaus lämpö- ja kosteustekniseltä toiminnaltaan käyttöön hyväksytyistä rakenteista. Uusien rakenteiden hyväksymisprosessi etenisi vaiheittain kohdekohtaisesta suunnittelusta ja toimivuuden varmistamisesta seurantaan ja mahdollisesti lopulta hyväksytyjen rakenteiden listalle, jolloin samalla myös kyseisen rakenneratkaisun mittaustarve vähenee ajan myötä.

Tilastollisesti luotettavien tulosten muodostaminen tietokantaan tallennetuista mittauspisteistä ja näihin liittyvistä tausta-aineistoista edellyttää riittävän suurta otoskokoja. Otskoon etukäteisarviointiin on olemassa menetelmiä, mutta nämä perustuvat usein oletuksiin suureiden jakaumasta ja sisältävät siten epävarmuutta. Lähtökohtana tulisi kuitenkin olla, että tiettyä rakennetta kuvaavia laadukkaita aikasarjoja tulisi olla vähintään useita kymmeniä. Tällaisten aineistomäärien kokoaminen edellyttää koko rakennusalan yhteisiä panostuksia, mutta toteutuessaan tarjoaisi poikkeuksellisen työkalun rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arvioimiselle ja kokonaisvaltaiselle kehittämiselle.

3.2 Tietokantaan lisättävien T/RH-aikasarjojen kuvailutiedot (metadata)

T/RH-mittausten tietokantaan lisättyjen aikasarjojen hyödyntämismahdollisuudet riippuvat vahvasti kuhunkin aikasarjaan liittyvien kuvailutietojen (metadatan) määrästä ja laadusta. Kuvailutietojen minimimäärä riippuu tavoitelluista käyttötarkoituksista, mutta useissa eri tilanteissa tarpeellisia tietoja ovat:

- Rakennuksen sijaintipaikkakunta, maastoluokka ja käyttötarkoitus
- Huonetilojen käyttötarkoitus ja olosuhteet sekä ulkopuolet varjostukset ja suojaukset
- Rakennuksen pohjakuva/muoto ja rakenneleikkaus, joista ilmenevät mittauspisteiden tarkka sijainti ja rakennetyypin tiedot
- Mittalaitteen merkki ja malli sekä standardiepävarmuudet.

T/RH-olosuhteille asetettavat tavoitteet (taulukko 1) voidaan määrittää eri vaurioitumistapoja kuvaavien mallien avulla, mutta myös tekemällä mitatuista kohteista rakenteiden kuntotutkimuksia ja analysoimalla näitä riittävän suurella otoskoolla. Tällainen lähestymistapa mahdollistaisi räätälöidymmän ja kattavamman arvioinnin kyseisistä rakenneratkaisuista, koska kuntotutkimusten avulla olisi mahdollista saada mukaan myös ilmiöitä, joille ei ole laskennallisia malleja käytettävissä.

4. Yhteenveto ja kehitys eteenpäin

Tässä kirjoituksessa käsiteltiin mahdollisuutta toteuttaa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden tavoitteenasettelu ja todentaminen hyödyntäen rakenteista tehtäviä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisia ja pitkäkestoisia mittauksia sekä mittaustuloksista koottavaa tietokantaa. Keskeisiä etuja menettelyssä olisivat tavoiteltujen ja toteutuneiden olosuhteiden vertailun selkiyttäminen, toteumatiedon tuominen kenttäolosuhteista suunnitteluvaiheeseen, uudet mahdollisuudet määritellä rakentamismääräysten laadulliset tavoitteet numeroarvoilla sekä yhteinen tapa kommunikoida rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen liittyvistä asioista. Aineistoja voitaisiin hyödyntää myös

laskentatulosten tarkkuuden arvioinnissa ja rakenneratkaisujen luokittelussa. Pitkäkestoisten ja jatkuvatoimisten mittausten laaja toteuttaminen ja hyödyntäminen edellyttäisi myös huomattavan määrän panoksia rakennusalan eri toimijoilta, jotta uusia käytäntöjä saataisiin kehitettyä, testattua ja otettua käyttöön. Konkreettisia asioita, joita rakennushankkeissa olisi tällä hetkellä mahdollista tehdä, olisivat esimerkiksi käynnissä olevien jatkuvatoimisten mittausten keston pidentäminen sekä uusien mittauspisteiden liittäminen mukaan datan määrän kasvattamiseksi, mittausdataa ja niiden kuvailutietoja koskevien avoimen datan lisenssiehtojen kirjaaminen mukaan sopimuksiin, sekä jo olemassa olevien mittausaineistojen lähettäminen artikkelin kirjoittajille tallentamista varten. Viimeisestä kohdasta on hahmoteltu esimerkiksi github.com -palvelussa olevaan TRH-1 -tietovarastoon [17].

Uusia menettelyjä käyttöön otettaessa on alkuvaiheessa hyvä ainoastaan kerätä kokemuksia ja tämän jälkeen hiljalleen kasvattaa vaatimusten tarkkuutta. Rakennusalalla on jo olemassa useita esimerkkejä muista mittauksiin perustuvista vaatimuksenmukaisuuden todentamisen menettelyistä, joten ajan myötä tällainen olisi varmasti rakennettavissa myös vaipparakenteiden käyttötilanteen lämpö- ja kosteustekniselle toimivuudelle.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus 782/2017 rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, ympäristöministeriö.
- [2] RT 103333 (2021) Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen, Rakennustieto Oy.
- [3] RT 10-11301 (2018) Talotekniikan laadunvarmistus- ja vastaanottomenettely, Rakennustieto Oy.
- [4] RT 07-11299 (2018) Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustieto Oy.
- [5] Ympäristöopas 2016 (2016) Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (toim. Miia Pitkäranta). Ympäristöministeriö.
- [6] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ril ry.
- [7] SFS-EN ISO 13788 (2013) Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. SFS ry.
- [8] SFS-EN 15026 (2007) Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. SFS ry.
- [9] Laukkarinen, A. (2015) Tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [10] Laukkarinen, A. & Vinha, J. (2017) Temperature and relative humidity measurements and data analysis of five crawl spaces. NSB 2017, Trondheim, Norway.
- [11] Laukkarinen, A., Musakka, S., Penttilä, O., Teriö, O. & Vinha, J. (2017) Puukerrostalon työmaavaiheen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittaukset. Rakennusfysiikka 2017, 24.-26.10.2017, Tampere.
- [12] Laukkarinen, A., Vinha, J., Kalbe, K., Kesti, J., Kalamees, T. & Honkakoski, E. (2020) Laboratory tests and modelling of mineral wool insulated steel sandwich panels. NSB 2020, Tallinn, Estonia.
- [13] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010) Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. Buildings Conference, Clearwater Beach, Florida.
- [14] JCGM 100 (2008) GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/guides>
- [15] JCGM 106 (2012) Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/guides>
- [16] Digi- ja väestötietovirasto, Avoindata.fi [Online]. <https://www.avoindata.fi/fi> [Haettu 23 8 2021].
- [17] Laukkarinen, A. (2021) TRH-1: Rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisten ja pitkäkestoisten kenttämittausten avoin tietokanta. Saatavilla: <https://github.com/anssilaukkarinen/trh-1>

Termorangan kylmäsilta vaikutuksen määrittäminen

Andreas Linnell ja Ghada Al-Adulrazzaq
Sweco Rakennetekniikka Oy

Tiivistelmä

Teräsohutelvyprofiili johtaa lämpö hyvin tehokkaasti teräksen suuren lämmönjohtavuuden arvosta vuoksi ja siten aiheuttaa seinärakenteessa suuren kylmäsilta vaikutuksen. Kylmäsilta vaikutuksen pienentämiseksi rankaprofiilien uumaan lisätään ns. termoreikiä, joiden tarkoitus on vähentää rangan läpi johtuvan lämpövirran määrää. Termoreikien ja villatyypin vaikuttavuuden määrittäminen koko ulkovaipparakenteen lämmöneristävyyteen ei ole yksinkertainen tehtävä. Tulokseen vaikuttaa rangan ainevahvuus, reikäkoko, jako ja symmetrisyys, jotka vaihtelevat eri valmistajilla. Saman reikäkoon symmetrinen reikälinja antaa huomattavasti paremmat tulokset kuin epäsymmetrinen linja. Kaikkien tapauksien lasketut tulokset osoittautuivat hieman heikommiksi kuin markkinoilla olevien termorankatoimittajien esittämät arvot.

1. Johdanto

Lämpötekniikan merkitys on korostunut vuosien mittaan ja siihen on pyritty perehtymään tarkemmin. Termoranka on kierrätettävänä teräsohutelvyrakenteena paljon käytetty seinäratkaisu, kun on ollut tarve kevyelle, ei kantavalle seinärakenteelle, joka on paljon vähemmän herkkä kosteudelle kuin esimerkiksi puurunkoinen seinä. Teräksellä on suuri lämmönjohtavuudenarvo, joten on pyritty pienentämään kylmäsiltojen vaikutusta lisäämällä rankaan reikälinjoja.

Termorankatoimittajilta on mahdollista saada tietoja heidän omien tuotteiden ja rakenneratkaisujen määrittetyistä lämmönläpäisykertoimista. Markkinoilla on kuitenkin useampi termorankaratkaisu ja ratkaisuja on hyvin vaikeaa verrata toisiinsa. Tämän takia halusimme selvittää yleisempien ratkaisujen erot (yleisempien käsitteiden ja väitteiden oikeellisuus) ja reikälinjojen vaikutus kylmäsiltoihin. Selvitystä varten päätimme simuloida ja vertailla erilaisia rankavaihtoehtoja erilaisilla villatyypeillä ja reikäkuviolla.

2. Termoranka ja markkinatuotteet

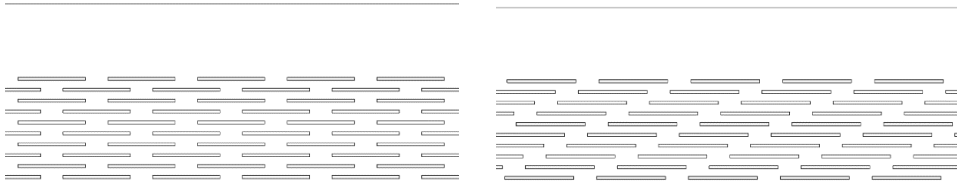
Termoranka on teräsohutelvyprofiili, jonka uuma on rei'itetty lämpövastuksen parantamiseksi. Koska termorankaa on helppo muotoilla omanlaiseksi, markkinoilta löytyy laaja valikoima rankavaihtoehtoja. Ranka voi olla muodoltaan esim. U, C tai Z-muotoinen. Yleisimmät ulkoseinärakenteissa käytettävien termorankojen korkeudet vaihtelevat 100...300 mm välillä ja niissä käytettyjen teräsohutelvyjen paksuudet 1...2 mm välillä. Rankapituus on useimmiten 1600...15000 mm välillä. Tavallisin rankajako ulkoseinässä on 600 mm. Rangan korkeudesta riippuen, rangassa on tavallisesti 8 tai 10 reikälinjaa. Reikälinjat voivat olla symmetrisiä toisiinsa nähden tai epäsymmetrisiä. Reikien dimensiot ja symmetrisyys vaikuttaa hyvin paljon rangan lämmönläpäisevyyteen.

2.1 Reikälinjan symmetrisyys

Lisäämällä termoreikiä rankaan, lämpövirta joutuu kiertämään reikien ympäri ja lämpögradientti siten tihenee rei'itettyllä alueella. Kasvattamalla termoreiän kokoa parannetaan rangan

lämmönvastusta, mutta samalla heikennetään sen jäykkyyttä ja kantavuutta. Reikälinjan kuviolla voidaan vaikuttaa lämpövirran suuruuteen.

Yleisimmät termorangan reikälinjojen kuviot ovat kuvan 1 mukaisia. Kuvan vasemmanpuoleisessa kuviossa on esitetty esimerkki symmetrisestä reikäkuviosta ja oikeanpuoleisessa kuviossa epäsymmetrisestä reikäkuviosta. Markkinoilla löytyy erilaisia väitteitä termorangan reikälinjojen symmetrisyyteen liittyen. Käytännössä rangan lämpövastus riippuu siitä, miten paljon pienempi pinta-ala on, jonka läpi lämmön pitää virrata sekä etäisyys, jonka sen pitää kulkea, ottaen huomioon, että lämpövirta on suurempi siinä, missä vastus on pienempi.



Kuva 1. Termoreikien yleisimmät kuviot.

3. Laskentamenetelmä

Erilaisten villatyypin, termoreikien määrän ja kuvion vaikutuksen selvittämiseksi simuloitiin erilaisia rankarakenteita 3D-mallin COMSOL Multiphysics 5.6-ohjelman avulla. Laskettiin ohjelmasta saaduista tuloksista standardien kaavojen avulla eri termorangoille U_{termo} -arvoa.

3.1 Standardit

Termorangoilla ei ole omaa tuotestandardia, joka määrittäisi lämpövastusta, vaan kuuluvat kylmämuovattuihin terästuotteisiin ja CE-merkitään EN 1090 mukaan. Jos niistä kuitenkin valmistetaan julkisivuelementtejä, ne kuuluvat julkisivujärjestelmiin. Tällöin ne tulee toteuttaa ja testata tuotestandardin SFS-EN 13830:2015+A1:2020 mukaisesti ja elementit tulee CE-merkitä.

Termorangan U-arvon laskennassa on otettava useampi standardi huomioon. Tärkeimmät huomioon otettavat standardit ovat SFS-EN ISO 12631:2017 ja SFS-EN ISO 10077-2:2017, joista löytyy kaavoja ja laskentaesimerkkejä erilaisille kevytrakenteisille seinäratkaisuille ja ikkunajärjestelmille. Näiden lisäksi on huomioitava standardit SFS-EN ISO 10211:2017 ja SFS-EN ISO 6946, joissa on esitetty laskentamenetelmiä ja -esimerkkejä kylmäsiltojen, rakenteiden lämmönvastusten ja lämmönläpäisykertoimien laskennalle.

3.2 Laskentamalli

Termorangan U-arvon laskentaa varten simuloitiin 3D-malleja monenlaisista tapauksista. Laskennassa käsiteltiin geometrialtaan erilaisia rankoja sekä villatyypiltään erilaisia tapauksia. Simuloinnin tuloksena saatiin kokonaislämpövirran arvoja valitun pinnan läpi menevälle osiolle, joita sovellettiin standardien kaavoihin.

3.2.1 Mallinnusgeometria

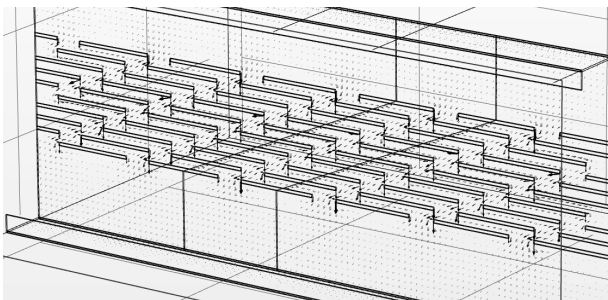
3D-mallien geometria luotiin parametreja käyttäen, jolloin geometrian muutokset hoituivat helposti ja nopeasti. Simuloinnissa mallinnettiin ainoastaan rankajakoa k600 vastaava malli, joka sisälsi 0,1...0,6 m pituinen C-muotoisen rangan ja villaa rangan kummallakin puolella suhteessa 0,55/2 m.

Vertailun vuoksi mallinnettiin 150, 175, 200, 225, 250, 275 ja 300 mm korkuisia C-rankoja, joiden tarkat dimensiot tarkistettiin yhden toimittajan profiilien mukaan. Lisäksi tarkasteltiin ohutlevyn paksuuden vaikutusta varioimalla ohutlevyn paksuutta 1,2, 1,5 ja 2 mm 250 mm korkean rangan tapauksessa. Kaikkien rankojen laipan leveys oli 50 mm.

3.2.2 Reikälinja

Kaikissa symmetrisissä termorankatapauksissa termorankojen reiät mallinnettiin 75 mm pituisina ja 3 mm leveinä (kuva 1 vasemmanpuoleinen tapaus). Reikien väliin jää pituussuuntaisesti 25 mm ja rangan korkeuden suuntaisesti 8 mm. Reikärivien määrä on 150...200 m korkeille rangoille 8 kpl ja 225...300 m korkeille rangoille 10 kpl. Näiden tapausten lisäksi mallinnettiin vertailun vuoksi 250 mm korkea ranka samoilla reikädimensioilla, mutta epäsymmetrisillä reikälinjoilla ja yhden epäsymmetrisen tapauksen eri reikädimensioilla.

Symmetriset rangat mallinnettiin 0,1 m pitkinä, jotta malliin saatiin tarpeeksi tarkka laskentaverkko ja siten tarpeeksi tarkat tulokset. Reikälinjojen symmetrisyyden takia oli mahdollista saada tarpeeksi hyvät tulokset näin lyhyestä mallista. Epäsymmetrisen reikälinjan kohdalla ei ollut puolestaan mahdollista mallintaa yhtä pientä ranka-alueita, sillä silloin katkaistaan lämpövirran lyhyemmän reitin ja se vääristää reikälinjan lämpövastusta, joten mallinnettiin 0,6 m pitkä termoranka ja rajattiin tulosalue 0,1 m pitkäksi. Tulosalueen ympärille jätettiin vähintään yksi täysi reitti, jota pitkin lämpövirta pääsee vapaasti läpi, jotta se ei aiheuta häiriöitä tulosalueelle. Epäsymmetrisen rangan mallissa koko mallin alueelta saatavat tulokset ovat paremmat kuin pienemmän alueen tulokset ja siten harhaanjohtavat. Koko mallin tuloksissa reikälinja katkeaa ja aiheuttaa reuna-alueilla suuremman lämpövastuksen kuin keskialueella (kuva 2). Vertailuun mukaan otettiin myös markkinoilla olevan tuotteen oikea reikäkoko ja jako.



Kuva 2. Epäsymmetrisen reikälinjan lämpövirran reitti. Rangan päädyssä epäjatkuvuutta, jonka takia tulosalue on keskellä rankaa.

3.2.3 Materiaalit

Mallissa käytettiin ainoastaan kolme materiaalia, joiden materiaalitiedot ovat laskentaohjelman omia. Termoranka mallinnettiin teräksenä, jonka lämpökapasiteetti oli 475 J/kgK, lämmönjohtavuus 50 W/mK ja tiheys 7850 kg/m³. Termorangan reiät mallinnettiin ilmaa

käyttäen ohjelman omia materiaalitietoja, poislukein lämmönjohtavuus, jossa käytettiin menetelmää, joka on validoitu EN 10077-2 standardin mukaan. Ilman lämmönjohtavuuden arvo vaihteli 0,0332...0,0335 W/mK välillä villatyypistä, termorangan paksuudesta ja termoreikien määrästä riippuen. Laskennan yksinkertaistamista ja nopeuttamista varten ilman lämmönjohtavuuden arvoksi käytettiin 0,03325 W/mK. Rankaa molemmin puolin rajoittavat lämmöneristeet mallinnettiin kolmenlaisina villatyyppeinä, joiden lämpökapasiteetti oli 850 J/kgK, lämmönjohtavuus 0,031...0,035 W/mK, tiheys 73 kg/m³.

3.2.4 Laskentaverkon asetukset

Laskentaa suoritettiin useammilla 'user-controlled mesh'-verkkoasetuksilla, kunnes löydettiin riittävän tarkka laskentaverkko. Laskentaa suoritettiin lopulta Comsolin 'Extra-fine' asetuksilla kaikille muille osille kuin orren teräsuomalle, jolle määritettiin elementtikooksi 0,1-0,5 mm. Verkon muoto oli 'Free Tetrahedral'. Epäsymmetriseen malliin jouduttiin hieman suurentamaan uuman elementtikokoa, mutta suoritettiin sen jälkeen vielä 'Adaptive Mesh Refinement'-toiminto, jolla verkon tiheys pieneni varsinkin reikien ympäristöllä. [1]

Ensimmäisen rakennetun kokeilumalli laskentaverkon koko oli pienemmillään uumassa noin 1,0 mm. Tämän mallin esim. TC250 t=1,5 ja 0,033 W/mK villatyypillä U-arvo on noin 20 % suurempi kuin lopullisen tarkan mallin U-arvo.

3.2.5 Reunaehdot

Laskentamallin ulkolämpötilaksi (T_e) määritettiin 0°C ja sisälämpötilaksi (T_i) 20 °C. Laskentamallin ulkopuolen pintavastukseksi (R_{se}) lisättiin 0,04 m²K/W ja sisäpuolen pintavastukseksi (R_{si}) 0,13 m²K/W. Mallinnettu symmetrisen reikälinjan rangan geometria oli 0,1 m pituinen, jonka kumpaankin päähän lisättiin pituussuunnassa symmetriaehto ja leveysuunnassa geometriaa rajaa adiabaattinen reunaehto. Epäsymmetrisen reikälinjan ranka on 0,6 m pituinen, jonka kumpaankin päähän lisättiin rajaavaksi materiaaliksi villaa, koska symmetriaehto ei voitu käyttää tähän rankatyypin.

4. Laskentatulokset

COMSOL-mallista laskettiin mallinnetun seinärakenteen läpi kulkeva lämpöteho (W) integroimalla sisäpinnan kokonaislämpövirtaa. Tämä arvo vastaa standardin EN ISO 12631:2017, osion 7.3.2.2.2 kaava 1:n kokonaislämpövirran \dot{q}_{tot} arvoa. Yhdistämällä edellä mainitun standardin osion kaavat 1 ja 2 [2] saadaan termorangan sisälaipan alueen lämmönläpäisevyyden arvon kaavaksi, jossa $sur_int(ht.ntflux)$ on lämpövirta, U_{eriste} on pelkän eristeen U-arvo, dT on sisä- ja ulkopinnan lämpötilaero ja A_i on kyseisen pinnan pinta-ala:

$$U_{termo} = \frac{sur_int(ht.ntflux)[W] - U_{eriste} \cdot A_{eriste} \cdot dT[W]}{A_{termo} \cdot dT[m^2K]} \quad (1)$$

Taulukoissa 1 ja 2 on listattu eri rankatyypin kokonaislämpövirran arvot eri villatyypeillä ja rankapaksuuksilla. Taulukossa 3 on esitetty reikälinjojen symmetrisyyden tulokset.

Taulukko 1. 250 mm korkean rangan kokonaislämpövirran [W] arvot 0,06 m² mallilla.

Villatyyppi (W/mK)	t= 1,2 mm	t= 1,5 mm	t= 2 mm
0.031	0.21265	0.22465	0.23947
0.032	0.21870	0.22628	0.24539
0.033	0.22060	0.23216	0.24953
0.034	0.22485	0.23733	0.25496
0.035	0.23090	0.24234	0.26048

Taulukko 2. eri termorankatyypin kokonaislämpövirran [W]arvot, kun $t=1,5$ mm ja villatyypin on $0,033$ W/mK.

Rankatyypin	Rei'itetty rankatyypin	Ehjat rankatyypin
150	0.34183	0.62616
175	0.30826	0.57202
200	0.29045	0.52701
225	0.24806	0.48973
250	0.23216	0.45891
275	0.21912	0.43165
300	0.20606	0.40713

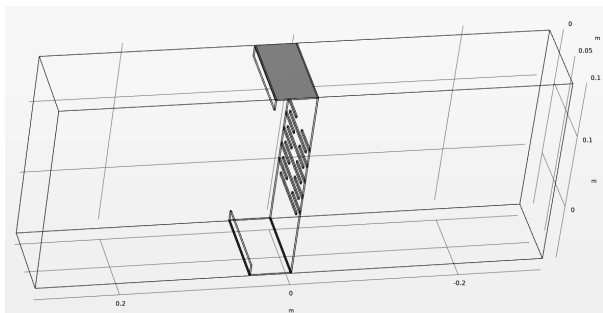
Taulukko 3. eri reikälinjakuvioiden kokonaislämpövirran [W]arvot, kun $t=1,5$ mm ja villatyypin on $0,031$ W/mK. (reikäkoko/reikäjako)

Reikäkuvin	TC250, $t=1,5$ mm
Symmetrinen reikälinja (75*3/100*11)	0.22465
Epäsymmetrinen reikälinja (75*3/100*11)	0.24008
Epäsymmetrinen reikälinja (90*4/100*14)	0.20675

Oetaan termorangan U-arvon laskentaesimerkiksi TC250 $t=1,5$ mm villatyypin $0,033$ W/mK. Tällöin kaavaan 1 syötetyt arvot ovat seuraavat:

$$U_{termo} = \frac{0,23216 \text{ W} - \frac{0,033 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,250 \text{ m}} \cdot 0,55 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 20 \text{ K}}{0,05 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 20 \text{ K}} = 0,8696 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Edellinen laskettu termorangan laipan U_{termo} -arvo on kuvan 4 mukaiselle alueelle:



Kuva 3. Termorangan laipan U_{termo} -arvon alue valittuna (harmaa).

4.1 Tulosten vertailu

Taulukon 1 tuloksia vertaillen huomataan, että villatyypin on pienempi vaikutus rakenteen lämpövirran arvoon ja siten termorangan lämmönläpäisyarvoon toisin kuin termorangan paksuudella. Esimerkiksi villatyypin ollessa $0,031$ W/mK, TC250 $t=1,2$ U_{termo} -arvoksi saadaan $0,7625$ W/m²K ja TC250 $t=2,0$ U_{termo} -arvoksi $1,0307$ W/m²K. Kun taas vaihtamalla villatyypin $0,035$ W/mK saadaan TC250 $t=1,2$ U_{termo} -arvoksi $0,7690$ W/m²K. Kun näistä muodostaa seinärakenteen (tuulensuojalevy-termorankaseinä-kipsilevy), jossa rankajako on 600 mm saadaan vastaavassa järjestyksessä seinärakenteiden U-arvoiksi $0,17$ W/m²K, $0,20$ W/m²K ja $0,19$ W/m²K. Tulokset ovat heikompi kuin markkinoilla olevien toimittajien esittämät arvot.

Taulukon 2 tuloksissa näkyy selvä hyppäys rankojen reikämäärän kasvaessa kahdeksasta reikälinjasta (150...200 mm) kymmeneen reikälinjaan (225...300 mm). Tämä todistaa reikämäärien suuren vaikutuksen termorangan lämmönläpäisevyyden arvoon. Umpirangan ja rei'itetyn rangan arvoja vertaillen todetaan, että umpirangan lämmönläpäisevyyden arvo ($TC_{250} t=1,5 U_{\text{termo}}=3,1371 \text{ W/m}^2\text{K}$) on yli kolminkertainen verrattuna rei'itettyyn rankaan ($TC_{250} t=1,5 U_{\text{termo}}=0,8696 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Vertaillen symmetrisiä ja epäsymmetrisiä reikälinjoja nähdään, että symmetristen reikälinjojen rangan kokonaislämpövirran arvo on huomattavasti pienempi verrattuna epäsymmetrisen reikälinjan rankaan termoreikien ollessa samankokoiset. Laskemalla taulukon 4 tulokset U_{termo} -arvoksi saadaan symmetriselle rangalle $0,8825 \text{ W/m}^2\text{K}$, kun taas vastaava arvo epäsymmetrisen reikälinjan rangalle on $1,0368 \text{ W/m}^2\text{K}$. Termoreikien koon kasvaessa, rangan U_{termo} -arvo pienenee $0,7035 \text{ W/m}^2\text{K}$, joka on jopa parempi kuin symmetrisen rangan arvo pienemmällä reikäkoolla.

5. Yhteenveto

Termorei'ittämällä teräsohutelvyprofiilien uumaa ulkoseinärakenteessa, pyritään pienentämään profiilien kylmäsiirtavaikutusta. Termorangan lämmönläpäisevyyden arvoon vaikuttaa hyvin moni tekijä, kuten rangan paksuus, villatyyppi, termoreikien dimensiot sekä reikälinjojen määrä ja symmetrisyys. Ainoat saatavilla olevat tiedot termorankojen lämpövirran käyttäytymisestä ja lämmönläpäisevyyden arvoista ovat markkinoiden rankatoimittajien ilmoittamat tiedot. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat kuitenkin heikommät kuin termorankatoimittajien ilmoittamat arvot.

Toiset tekijät vaikuttavat voimakkaammin kuin toiset. Villan lämmönjohtavuuden pienentäminen vaikuttaa hyvin pienesti rangan lämmönläpäisevyyden arvoon, mutta vaikuttaa suuresti koko seinärakenteen lämmönläpäisevyyden arvoon. Kasvattamalla termoreikien dimensioita ja määrää jää pienempi ehjä alue lämpövirralle ja sitten lämmönläpäisevyys paranee. Reikälinjojen asettelulla on lisäksi suuri vaikutus rangan lämmönläpäisevyyteen. Asettamalla reikälinjat symmetrisesti asetetaan lämpövirralle pidempi ja vaikeampi matka kulkea rangan toiseen päähän ja näin parannetaan rangan lämmönläpäisevyyden arvoa.

Simuloinnissa laskentaverkon muodolla ja koolla on hyvin suuri merkitys tulosten tarkkuuteen. Mittojen ollessa pieniä ja tarkastelun ollessa 3-ulotteinen vaaditaan laskentaverkon tarkkaa määrittelyä. Tämä puolestaan kasvattaa mallin kokoa liian suureksi ja pidentää laskenta-aikaa liian pitkäksi. Tarpeeksi tarkkojen tulosten saavuttamiseksi on pidettävä malli tarpeeksi pienenä ja oltava tarkka mallintamisalueen valinnassa tai käyttää suurteholaskentaa. Reikäkuviosta riippuen, ei ole aina mahdollista pitää mallia tarpeeksi pienenä. Tällöin on oltava tarkka tulosten alueen valinnassa ja laskentaverkon paikallisia alueita tarkentaessa.

Lähdeluettelo

- [1] Comsol Multiphysics Reference manual, https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf
- [2] SFS-EN ISO 12631:2017 Thermal performance of curtain walling. Calculation of thermal transmittance. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Kutterinlastueristeisten ulkoseinärakenteiden koerakennuskokeet ECOSAFE-hankkeessa

Jaakko Hietikko, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmä tekee osana Ympäristöministeriön rahoittamaa ECOSAFE hanketta erilaisten seinärakenteiden tutkimusta. Tutkimuksessa verrataan Hervannan koerakennuksiin asennettujen erilaisten seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa kahdella eri julkisivulla. Sekä etelä- että pohjoisjulkisivulle on asennettu neljä erilaista noin 1,2x2,5m² seinäelementtiä, jotka on anturoitu suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seuraamiseksi rakenteen eri kerroksissa. Kaikkiaan elementeissä on vertailtavana neljä eri tuulensuojamateriaalia: kipsilevy, bitumoitu huokoinen kuitulevy, savikutteriseoslevy ja mineraalivillatuulensuojalevy. Huokolevyllä on toteutettu kaksi elementtiä, joista toisen eristekutteri on käsitelty savella. Kipsituulensuojallisessa elementissä on lisäksi tiiliverhous ukopinnassa ja höyrynsulku sisäpinnassa, kun muilla rakenteilla julkisivuna on puupanelointi ja sisäpinnassa ei ole höyrynsulkua. Muuten elementtien rakenteet ovat toisiaan vastaavia: 300 mm eristepaksuus, k-k 600 mm kertopuutolpat ja sisäpinnan 15 mm havuvanerilevy. Elementtien välistä rakennusfysikaalista toimintaa on verrattu toisiinsa. Kaikkiin elementteihin vaikuttaa vertailukelpoinen sisäilman olosuhde ja ulkoilman sää. Kosteusteknisesti parhaiten toimiviksi ratkaisuisiksi osoittautui savetettu kutteri ja mineraalivillatuulensuoja.

1. Johdanto

Tampereen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Rakennusfysiikan tutkimusryhmä on saanut Ympäristöministeriöltä rahoitusta ”Kasvua ja kehitystä puusta” -ohjelmasta ECOSAFE-hankkeelle. Hankkeessa tutkitaan purueristeiden kosteusteknistä toimintaa rakenteissa. Hankkeen yhtenä osana on Tampereen yliopiston Hervannan kampukselle rakennetuissa koerakennuksissa tehtävät kokeet.

Koerakennuksiin voidaan asentaa etelä- ja pohjoisjulkisivuille noin 1,2 x 2,5 m² seinäelementtejä yhteensä 24 kpl ja noin 1,8 x 4 m² harjakattoelementtejä yhteensä 6kpl. Tässä hankkeessa seinäelementtejä on asennettu yhteensä kahdeksan kappaletta, neljä molemmille julkisivuille. Seinäelementeissä on valikoituja toisistaan poikkeavia rakennekerroksia ja kattava lämpötilan ja suhteellisen kosteuden anturointi, jotta toisistaan poikkeavien rakennekerrosten vaikutusta koko rakenteen kosteustekniseen toimintaan voidaan verrata. Rakenteen sisäisten olosuhteiden lisäksi seurattiin sisäilman olosuhteita ja ulkoilman säätä Vaisalan sääaseman avulla.

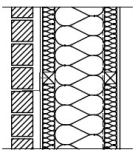
2. Tutkittavat elementit

2.1 Rakennetyypit

Tutkittavat rakenteet on kaikki tehty samalla tavalla k-k 600 mm, 51x300 mm² kertopuulla ja 15 mm havuvaneripohjalla toteutettuun runkoon. Havuvaneri toimii sisäpinnassa höyryn- ja ilmansulkuna. Runko anturoitiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamiseksi rakenteen sisältä eri kohdista. Anturoitu elementti puhallettiin täyteen eristettä Punkaharjun Puutaito Oy:n

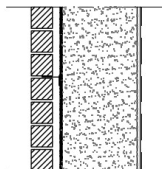
seinäelementtitehtaan levypuhalluslaitteella. Puhallus tehtiin 30 mm ylitäyttöön ja eriste tiivistettiin mekaanisesti puristamalla ennen kotelon sulkemista tuulensuojalevyllä. Näin pyrittiin välttämään eristeen painuminen tutkimuksen aikana.

Jokaista elementtityyppiä rakennettiin kaksi kappaletta: toinen etelä- ja toinen pohjoisjulkisivulle asennettavaksi. Yksittäinen elementti (E2) eristettiin savetetulla kutterinlastulla, koska sen otaksuttiin parantavan kutterinlastun kosteusteknistä toimintaa. Muissa elementeissä käytettiin puhdasta kutterinlastua, mutta toisistaan poikkeavia tuulensuojamateriaaleja: Yksi toteutettiin savetetun kutterinlastun rinnakkaiselementiksi (E4) siten, että molemmissa on 25 mm bitumoitui huokoinen kuitulevy tuulensuojana. Yhdessä elementissä on kipsituulensuoja (E1) ja muista rakenteista poiketen myös höyrynsulkumuovi, koska kipsituulensuojallista elementtiä haluttiin ensisijaisesti verrata mineraalivillaeristettyihin, toisen hankkeen elementteihin (W5), jotta voidaan osoittaa kutterinlastun ja mineraalivillan kosteusteknisen toiminnan eroavaisuutta. Viimeiseksi esiteltävän elementin runkotolppavälit toteutettiin kahdella eri tuulensuojamateriaalilla, koska hankkeen alkuvaiheessa suunnitellun savikutterituulensuojan (E3-S) lisäksi haluttiin testata Antti Forssin [1] työn perusteella potentiaalisiksi osoittautuneen mineraalivillatuulensuojan (E3-V) käyttäytymistä. Elementtien ulkopinnat verhoiltiin ponttilautaverhouksella pois lukien kipsituulensuojallinen elementti, johon tehtiin mineraalivillaelementteihin vertailtavuuden parantamiseksi tiilijulkisivu. Elementtien rakennetyypit on esitetty kuvassa 1.



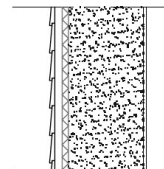
Rakennetyyppi W5

Tiilimuuraus	85 mm
Tuuletusväli ja pystykoolaus	30 mm
Tuulensuojakipsilevy	9 mm
Lämmöneriste ja vaakakoolaus	50 mm
Lämmöneriste ja runkotolpat	200 mm
Höyrynsulku	
Lämmöneriste ja vaakakoolaus	50 mm
Kipsilevy	13 mm



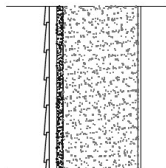
Rakennetyyppi E1

Tiilimuuraus	85 mm
Tuuletusväli	30 mm
Kipsituulensuojalevy	9 mm
Pölkky kutterinpueristys	300 mm
Vaneri	15 mm
Höyrynsulkumuovi	



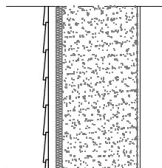
Rakennetyyppi E2

Puuverho	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuojalevy	25 mm
Savetetty Pölkky kutterinpueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



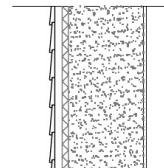
Rakennetyyppi E3-S

Puuverho	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Savituulensuoja	30 mm
Pölkky kutterinpueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



Rakennetyyppi E3-V

Puuverho	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc mineraalivillatuulensuojalevy	30 mm
Pölkky kutterinpueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



Rakennetyyppi E4

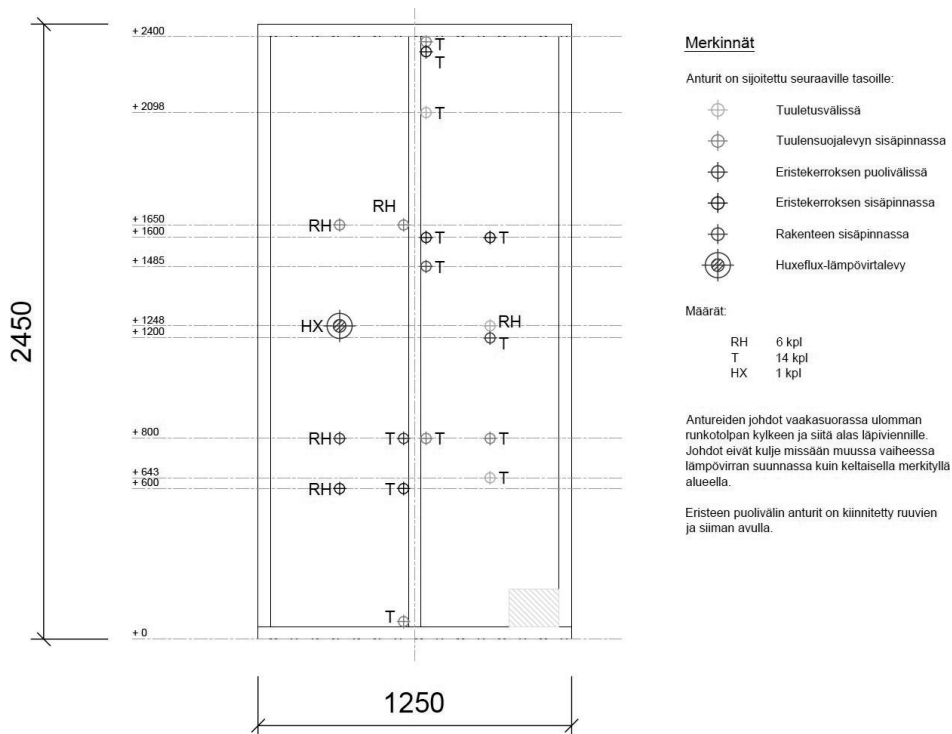
Puuverho	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuojalevy	25 mm
Pölkky kutterinpueristys	300 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 1. Tutkittujen elementtien rakennetyypit

2.2 Anturointi

Kaikki elementit anturoitiin samalla tavalla. Kahden erilaisen tuulensuojalevyn elementissä toinen runkotolppaväli lisäanturoitiin vasta eristeen asennuksen jälkeen, joten savikutteri- ja mineraalivillatuulensuojalevyn runkotolppaväleissä antureita ei ole lisätty eristekerroksen sisälle. Tällä ei ole merkitystä tulosten kannalta, koska kriittisin tarkastelupiste kaikilla rakenteilla on tuulensuojalevyn sisäpinta runkotolppien puolivälissä, koska eriste on yhtä herkkä kosteudelle kuin runkotolpat. Runkotolppien puolivälissä lämpötila tuulensuojalevyn sisäpinnassa on matalampi kuin runkotolpan kohdalla.

Elementtien anturointi on esitetty kuvassa 2. Savikutterituulensuojalevyn runkotolppaväliin on kuvassa esitetyn anturoinnin lisäksi lisätty anturit tuulensuojalevyn sisäpintaan ja tuuletusväliin.



Kuva 2. Elementtien antureiden sijainnit

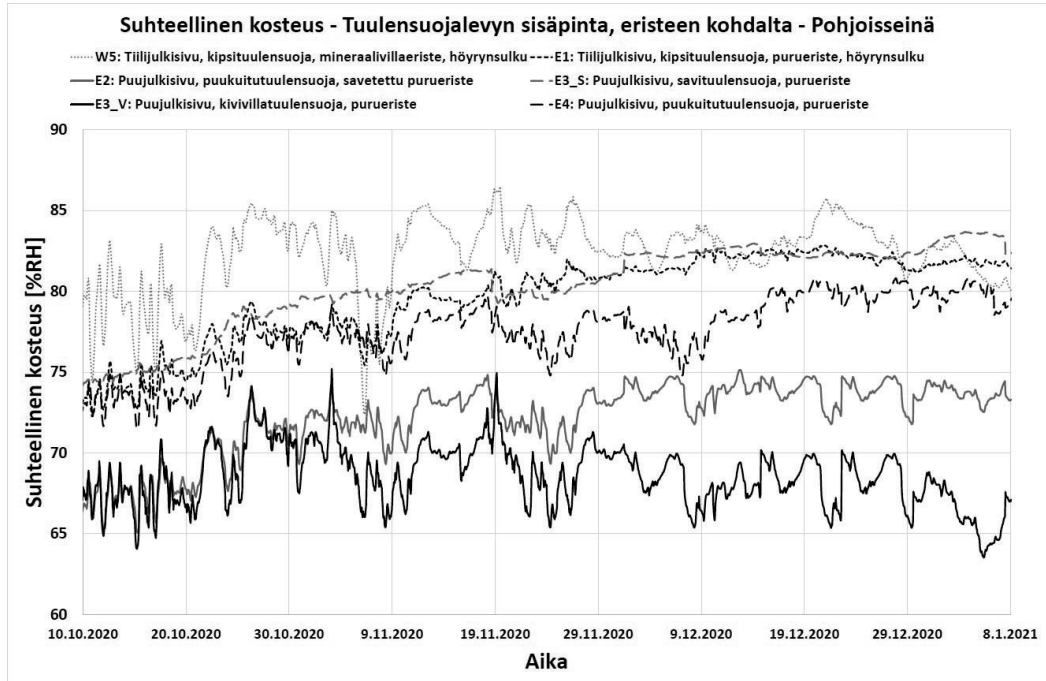
3. Tulokset

Elementtien eri antureilta saatuja mittaustuloksia on käyty läpi ja vertailtu elementtien välillä, jotta on varmistuttu tulosten vertailukelpoisuudesta. Tässä artikkelissa mittaustulosten esittely keskittyy tuulensuojalevyn sisäpinnan tulosten esittelyyn, koska tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei tulisi sallia homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Tuulensuojalevyn ulkopinta on lähes ulkoilman olosuhteissa, eikä sen olosuhteisiin voi vaikuttaa. Tuulensuojan sisäpinnassa on yleensä myös rakennuksen runko, jonka homehtumista ei tulisi sallia. Syvemmillä rakenteissa lämpötila on

tuulensuojan sisäpintaa korkeampi, joten suhteellinen kosteus jää lähes poikkeuksetta matalammaksi, vaikka kosteusvirta on tyypillisesti rakenteen sisältä ulospäin.

3.1 Olosuhteet tuulensuojalevyn sisäpinnassa

Tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden kuvaajat loppuvuodelta 2020 pohjoisseinältä on esitetty kuvassa 3. Suhteellisen kosteuden tasot eteläseinällä ovat auringon säteilyn myötä usein alhaisemmat, mutta rakenteiden järjestys kosteustasojen osalta pysyy pääosin samana.



Kuva 3. Suhteellinen kosteus eri elementtien tuulensuojalevyn sisäpinnassa.

Kuvassa 3 kaksi alimmaista käyrää ovat mineraalivillatuulensuojallinen rakenne E3_V ja savetetulla kutterinpurulla eristetty rakenne E2. Vuodenvaihdetta lähestyttäessä ulkoilman lämpötila laskee. Tällöin mineraalivillatuulensuojan eristävyys tulee vahvemmin esille ja suhteellinen kosteus verrattuna syksyllä saman kosteustason savetetun kutterin elementtiin laskee. Pienemmissä lämpötiloissa jo muutaman asteen lämpötilaero voi näkyä, absoluuttisen kosteuden pysyessä muuttumattomana, jo useiden prosenttien muutoksena suhteellisessa kosteudessa.

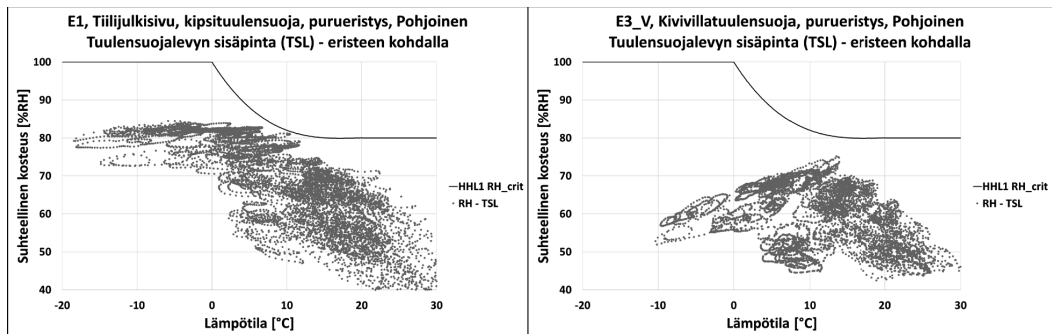
Kuvasta nähdään, että mineraalivillatuulensuojallisessa rakenteessa suhteellinen kosteus pysyy alhaisimpana johtuen pääosin mineraalivillatuulensuojan hyvästä lämmöneristyskyvystä. Myös sillä on oletettavasti vaikutus, että mineraalivillatuulensuoja läpäisee kosteutta todella hyvin ja absoluuttinen kosteus tuulensuojan sisäpinnassa on lähellä ulkoilman vastaavaa. Savetetun eristekutterin elementissä on myös joukon alhaisinta päätä edustava kosteustaso. Kun verrataan sitä savettamattoman kutterin vastaavaan elementtiin, havaitaan, että kosteustaso on alempi mahdollisesti sen vuoksi, että savetus on lisännyt seinän kosteuskapasiteettia.

Savituulensuojan suuri kosteuskapasiteetti tasaa hyvin olosuhdetta verrattuna muihin, mutta sen heikompi lämmöneristys ja vesihöyrynläpäisy aiheuttavat ryhmän heikoimmassa päässä olevia kosteustasoja. Kipsituulensuojalevyllisten elementtien välillä havaitaan, että purueristeen suurempi kosteuskapasiteetti parantaa olosuhteita rakenteen sisällä, mutta höyrynsulusta huolimatta kipsituulensuojalevyn sisäpinnan kosteusolosuhde on muita rakenteita korkeampi. Tämä voi olla seurausta myös poikkeavasta ulkoverhousmateriaalista, eikä osoita kipsituulensuojan eroa esimerkiksi tutkimuksessa mukana olleeseen puukuitutuulensuojaan.

3.2 Homehtumiselle otollisten olosuhteiden esiintyvyys

Tuulensuojan sisäpinnan toteutuneille olosuhteille laskettiin homeindeksit Suomalaisen homemallin [2] avulla. Homeindeksit eivät odotetusti nousseet juurikaan ja niiden avulla rakenteita ei pysty asettamaan paremmuusjärjestykseen. Täytyy muistaa, että toteutetut rakenteet ovat varsin tyypillisiä ja edustavat Suomessa käytettyjä rakennetyyppejä. Niiden ulkopinnan homehtuminen ei nykyilmastossa ole odotettavissa saatikka toivottavaa, mutta ilmastonmuutoksen myötä olosuhteiden kriittisyys tulee kasvamaan ja nyt heikkoiten toimivat rakenteet todennäköisesti muuttuvat ongelmarakenteiksi.

Suomalaisen homemallin mukaisesti laskettavassa homeindeksin kaavassa voidaan tunnistaa kriittinen kosteustaso (RH_{crit}), jonka jälkeen homehtuminen on mahdollista. Kriittinen kosteustaso riippuu materiaalin homehtumisherkkyysluokasta ja lämpötilasta. Kriittisen kosteustason ylityessä alkaa homeen itämisäika, joka täyttyy, kun saavutetaan homeindeksin arvo 1. Kuvassa 4 on esitetty rakenteiden E1 ja E3_V lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittapistepilvi ja kutterieristeen homehtumisherkkyysluokan 1 kriittisen kosteustason käyrä. Mitä enemmän pisteitä on kriittisen kosteustason käyrän yläpuolella, sitä vähemmän rakennetyyppi kestää ilmaston muuttumisen aiheuttamaa kosteustason nousua. Myös mitä kauempana piste on ylitse kriittisen kosteustason käyrästä, sitä nopeammin homeindeksi alkaa kehittyä.



Kuva 4. Tiiliverhoillun kipsituulensuojalevyllisen kutterieristetyn rakenteen E1 ja puuverhoillun mineraalivillatuulensuojalevyllisen kutterieristetyn rakenteen E3_V lämpö- ja kosteustasot koko tutkimuksen ajalta.

Kuvasta 4 nähdään, ettei tutkimuksen mittausjaksolla ole vielä esiintynyt homeenkasvun kannalta kriittisiä olosuhteita. Rakenne E3_V on kuitenkin kosteusteknisesti selvästi paremmin toimiva ja tulee kestävämmän huomattavasti raskaampia kosteuskuormia kuin rakenne E1.

4. Yhteenveto

Ympäristöministeriö rahoittamassa ECOSAFE-hankkeessa tutkittiin kutterinlastueristeisten seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa koerakennuksilla, jossa rakenteisiin kohdistuu nykyilmaston mukainen sääräsitus ja yhtäläinen sisäilman olosuhde. Vertailtavana oli erityyppisiä tuulensuoja- ja eristemateriaaleja.

Tutkimuksessa havaittiin, että kutterinlastueristeen käyttö mineraalivillaeristeen sijaan madaltaa kipsituulensuojalevyllisen rakenteen homeutumisriskiä. Vastaavasti havaittiin, että savikutterituulensuoja ei suuresta kosteuskapasiteetista huolimatta ollut erityisen hyvä tuulensuojamateriaali. Mineraalivillatuulensuoja sen sijaan osoittautui hyväksi rakenteen kosteustekniselle toiminnalle. Myös tutkimuksessa mukana ollut savetettu kutteri osoittautui kosteustekniseltä toiminnaltaan paremmaksi kuin vastaava kutteri savettamattomana.

Tutkimuksen perusteella ei saatu tietoa kipsituulensuojan ja muiden tuulensuojalevyjen välisistä eroavaisuuksista, koska kipsituulensuojalevyllisissä rakenteissa oli poikkeava ulkoverhousmateriaali. Savetetun kutterinlastun parempi kosteustekninen toiminta jäi myös osin selittämättä ja savetetun kutterin ominaisuuksia ja savetuksen vaikutusta kutterinlastueristeelle on tarve tutkia lisää. Savetetun kutterinlastun lisätutkimuksia varten on käynnistetty myöskin Ympäristöministeriön, mutta osin myös yritysten rahoittama ECOSAFE2-hanke, jossa selvitetään savetetun kutterin käyttöä rakenteissa monesta eri näkökulmasta.

Lähdeluettelo

- [1] Forss, A. 2021. Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202012219038>
- [2] Vinha, J. Viitanen, H. Lähdesmäki, K. Peuhkuri, R. Ojanen, T. Salminen, K. Paajanen, L. Strander, T. Iitti, H. Julkaisematon. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homeutumisriskin laskennallinen arviointi

Mineraalivillaeristeisten ulkoseinärakenteiden koerakennuskokeet Future Spaces -hankkeessa

Eero Tuominen, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmä tekee osana Business Finlandin ja yritysten rahoittamaa Future Spaces -hanketta erilaisten seinärakenteiden tutkimusta. Tutkimuksessa verrataan Hervannan koerakennuksiin asennettujen erilaisten seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa kahdella eri julkisivulla. Sekä etelä- että pohjoisjulkisivulle on asennettu viisi erilaista noin 1,2x2,5m² seinäelementtiä, jotka on anturoitu suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seuraamiseksi rakenteen eri kerroksissa. Kaikkiaan elementeissä on vertailtavana kaksi eri eristepaksuutta: 150 ja 300 mm, sekä kaksi eri julkisivuvaihtoehtoa molemmilla eristepaksuuksilla: paikalla muurattu tiilijulkisivu ja ponttilautaverhous. Muilta osin rakenteet ovat 150 tai 50+200+50 mm puurungollisia, lasivillaeristettyjä, höyrünsulkumuovilla varustettuja ja sekä rungon sisä- että ulkopinnassa on soveltuva kipsilevyverhous. Lisäksi on yksi tiili-villa-tiili, paikalla muurattu rakennetyyppi. Elementtien välistä rakennusfysikaalista toimintaa on verrattu toisiinsa. Kaikkiin elementteihin vaikuttaa sama sisäilman olosuhde ja ulkoilman sää. Kosteusteknisesti parhaiten toimiviksi rakenteiksi tämän tutkimuksen osalta osoittautuivat ohuemmin eristetyt rakennetyypit. Julkisivumateriaalilla ei tutkitulla aikajaksolla sen sijaan ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin.

1. Johdanto

Tampereen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Rakennusfysiikan tutkimusryhmä on osana laajempaa tutkimuskonsortiota saanut Business Finlandilta rahoitusta Future Spaces -hankkeelle. Osana hanketta tutkitaan RAPID U -hankkeessa koerakennukseen tehtyjen seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa.

Koerakennuksiin voidaan asentaa etelä- ja pohjoisjulkisivuille noin 1,2 x 2,5 m² seinäelementtejä yhteensä 24 kpl ja noin 1,8 x 4 m² harjakattoelementtejä yhteensä 6kpl. Tässä hankkeessa tutkitaan yhteensä kymmentä toisessa hankkeessa rakennettua seinäelementtiä ja kuutta kattoelementtiä. Jokaista seinärakennetyyppiä on kaksi kappaletta, yksi etelä- ja pohjoisjulkisivulla ja siten eri elementtityyppejä on viisi kappaletta. Kattoelementtejä koskeva tutkimus on raportoitu osana toista artikkelia.

Seinäelementeissä on varioitu eristepaksuutta siten, että elementit edustavat Suomessa varsin tyypillisiä eri aikakausien rakenteita. Lisäksi on varioitu julkisivumateriaalia, koska tiedetään, että julkisivumateriaalilla voi olla merkittävä vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Elementtien kosteusteknistä toimintaa havainnoidaan kattavalla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden anturoinnilla, jotta rakennetyyppien välisiä eroja kosteusteknisessä toiminnassa voidaan verrata. Rakenteen sisäisten olosuhteiden lisäksi seurattiin sisäilman olosuhteita ja ulkoilman säää Vaisalan sääaseman avulla.

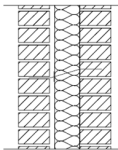
2. Tutkittavat elementit

2.1 Rakennetyypit

Tutkittavista rakenteista neljä on puurungollisia ja yksi tiilirungollinen rakenne. Rakennetyypit (W2-W5) ovat pientaloissa tyypilliset: puurunko k-k 600 mm jaolla, mahdollinen ristiinkoolaus, lasivillaeristys, höyrysulkumuovi kantavan rungon sisäpinnassa, sisäpinnan kipsilevyverhous, kipsituulensuoja, tuuletusrako ja ulkoverhousmateriaali. Tiilirungollinen rakenne (W1) on valittu Jaakko Tuikan diplomityön [1] laskennallisissa tarkasteluissa käytetystä tiili-villa-tiili rakenteesta, jossa kahden umpitiikerroksen välissä on mineraalivilla ja tuuletusrako. Rakenteessa ei ole tuulensuoja- tai höyrynsulkukerrosta. Tutkittavien elementtien materiaalit on hankittu rautakaupasta, ja elementit on rakentanut ja rakentamisen yhteydessä anturoinut Tampereen yliopiston tiloissa Jaakko Hietikko osana diplomityötään.

Puurungollisissa rakennetyypeissä on kaksi eristevariaatiota, joista ohuen eristeen tapauksessa 150 mm eristekerros on asennettu 150 mm puurungon väliin (W2, W4). Paksun eristeen tapauksessa on käytetty 200 mm puurunkoa, jonka molemmat pinnat on ristiinkoolattu ja eristetty, jotta 300 mm eristepaksuus saavutetaan (W3, W5). Näiden rakennetyyppien julkisivuina on sekä puu- että tiilijulkisivu toteutettuna 22 mm julkisivupaneelilla (W2, W3) tai 85 mm reikätiilillä (W4, W5). Tiiliverhoillusta rakenteesta on lisäksi mukana myös ECOSAFE-hankkeessa tutkittava kutterieristetty rakenne (E1), jonka avulla voi havainnoida lämmöneristeen kosteuskapasiteetin vaikutusta. Eri rakennetyyppien leikkauskuvat on esitetty kuvassa 1.

W1 Tiili-villa-tiili

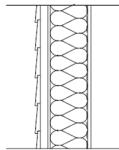


Rakenne ulkoa sisäänpäin:

- | | |
|-----------------|--------|
| 1. Tiilimuuraus | 123 mm |
| 2. Tuuletusväli | 20 mm |
| 3. Lämmöneriste | 100 mm |
| 4. Tiilimuuraus | 123 mm |

Rakenteen laskennallinen referenssi U-arvo
U_{ref} = 0,288 W/m²K

W2 Puujulkisivu, ohut eristys

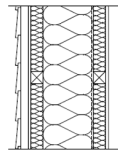


Rakenne ulkoa sisäänpäin:

- | | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Puuverhous | 22 mm |
| 2. Tuuletusväli ja pystykoolaus | 30 mm |
| 3. Tuulensuojakipsilevy | 9 mm |
| 4. Lämmöneriste ja runkotolpat | 150 mm |
| 5. Höyrynsulku | 13 mm |
| 6. Kipsilevy | |

Rakenteen laskennallinen referenssi U-arvo
U_{ref} = 0,268 W/m²K

W3 Puujulkisivu, paksu eristys

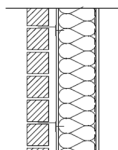


Rakenne ulkoa sisäänpäin:

- | | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Puuverhous | 22 mm |
| 2. Tuuletusväli ja pystykoolaus | 30 mm |
| 3. Tuulensuojakipsilevy | 9 mm |
| 4. Lämmöneriste ja vaakakoolaus | 50 mm |
| 5. Lämmöneriste ja runkotolpat | 200 mm |
| 6. Höyrynsulku | 50 mm |
| 7. Lämmöneriste ja vaakakoolaus | 50 mm |
| 8. Kipsilevy | 13 mm |

Rakenteen laskennallinen referenssi U-arvo
U_{ref} = 0,139 W/m²K

W4 Tiilijulkisivu, ohut eristys

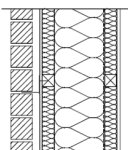


Rakenne ulkoa sisäänpäin:

- | | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Tiilimuuraus | 85 mm |
| 2. Tuuletusväli ja pystykoolaus | 30 mm |
| 3. Tuulensuojakipsilevy | 9 mm |
| 4. Lämmöneriste ja runkotolpat | 150 mm |
| 5. Höyrynsulku | 13 mm |
| 6. Kipsilevy | |

Rakenteen laskennallinen referenssi U-arvo
U_{ref} = 0,247 W/m²K

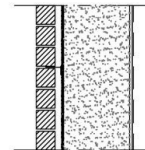
W5 Tiilijulkisivu, paksu eristys



Rakenne ulkoa sisäänpäin:

- | | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Tiilimuuraus | 85 mm |
| 2. Tuuletusväli ja pystykoolaus | 30 mm |
| 3. Tuulensuojakipsilevy | 9 mm |
| 4. Lämmöneriste ja vaakakoolaus | 50 mm |
| 5. Lämmöneriste ja runkotolpat | 200 mm |
| 6. Höyrynsulku | 50 mm |
| 7. Lämmöneriste ja vaakakoolaus | 50 mm |
| 8. Kipsilevy | 13 mm |

Rakenteen laskennallinen referenssi U-arvo
U_{ref} = 0,133 W/m²K



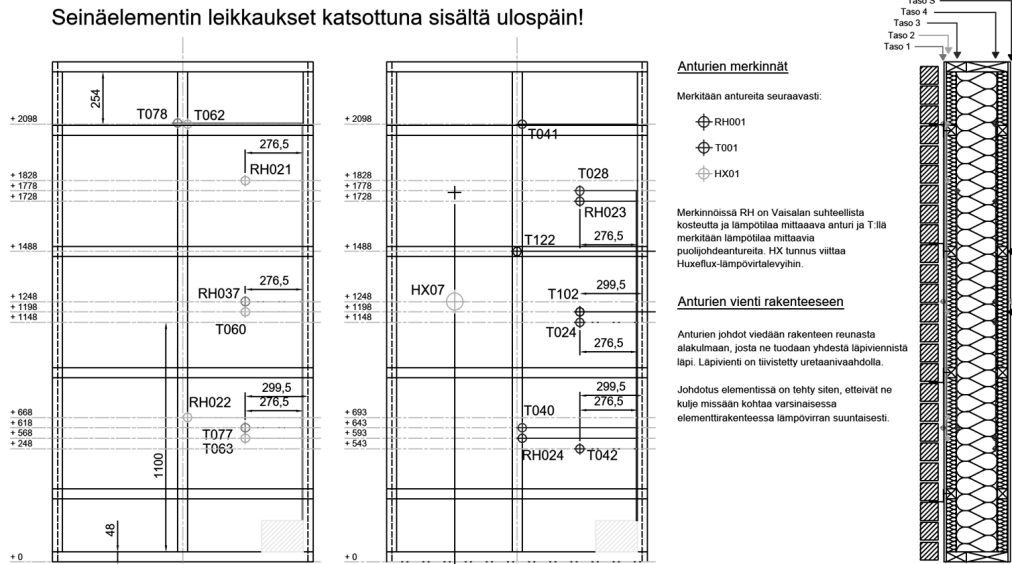
Rakennetyyppi E1

- | | |
|---------------------------|--------|
| Tiilimuuraus | 85 mm |
| Tuuletusväli | 30 mm |
| Kipsituulensuojalevy | 9 mm |
| Pölkky kutterinpuueristys | 300 mm |
| Vaneri | 15 mm |
| Höyrynsulkumuovi | |

Kuva 1. Tutkittujen elementtien rakennetyypit

2.2 Anturointi

Kaikki elementit anturoitiin samalla tavalla, joskin tiilirunkoisessa elementissä on vähemmän rakenneosia ja siinä anturit on asennettu vain rakennekerrosten rajapintoihin ja siten antureita on kokonaisuutena vähemmän. Anturit on pääosin sijoitettu yhteen runkotolppaväliin, koska toisen runkotolppavälin tuulensuojalevyistä on suunniteltu tutkimuksen aikana otettavan näytteitä homeen kasvun analysoimiseksi. Anturityyppeinä on suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaauksessa käytetty Vaisalan HMP110 -antureita, pelkän lämpötilan mittaauksessa TI LM355 - puolijohdeantureita, ja lämpövuon mittaauksessa Hukseflux HFP01-antureita. Elementtien anturointi on esitetty kuvassa 2.



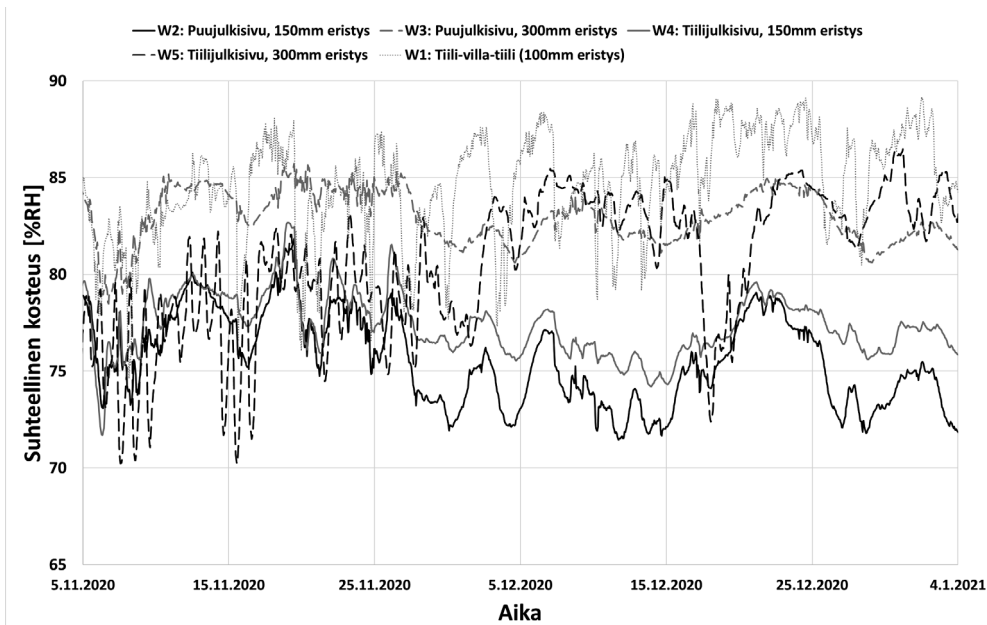
Kuva 2. W5-elementin anturoinnit, muissa elementeissä anturit vastaavissa sijainneissa

3. Tulokset

Tässä artikkelissa mittaustulosten esittely keskittyy tuulensuojalevyn sisäpinnan tulosten esittelyyn, koska tuulensuojalevyn sisäpinnassa, ei tulisi sallia homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Tuulensuojalevyn ulkopinta on lähes ulkoilman olosuhteissa, eikä sen olosuhteisiin voi vaikuttaa. Tuulensuojan sisäpinnassa yleensä on myös rakennuksen runko, jonka homehtumista ei tulisi sallia. Syvemmillä rakenteissa lämpötila on tuulensuojan sisäpintaa korkeampi, joten suhteellinen kosteus jää lähes poikkeuksetta matalammaksi, koska ehjä höyrönsulku pienentää sisäilman kosteuden vaikutusta rakenteeseen.

3.1 Olosuhteet tuulensuojalevyn sisäpinnassa

Tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden kuvaajat loppuvuodelta 2020 pohjoisseinältä on esitetty kuvassa 3. Suhteellisen kosteuden tasot eteläseinällä ovat auringon säteilyn myötä usein alhaisemmat, mutta rakenteiden järjestys kosteustasojen osalta pysyy pääosin samana.



Kuva 3. Suhteellinen kosteus eri elementtien tuulensuojalevyn sisäpinnassa.

Kuvasta 3 nähdään, että ohuemmin eristetyillä rakenteilla tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellinen kosteus pysyy huomattavasti matalampana kuin paksuimmin eristetyillä rakenteilla. Tämä on odotettavissa oleva tulos, koska paksumpi eristekerros viilentää rakenteiden ulko-osia vaikuttamatta ulko-osien absoluuttisen kosteuden tasoon. Tuloksista nähdäänkin selvästi, että suurilla eristepaksuuksilla rakenteen sietokyky ilmastonmuutokselle ja ulkoilman kosteustason nousulle on heikko.

Kokotiilinen rakenne on kaikista kostein, mutta siinä ei ole lainkaan homehtumiselle herkkiä materiaaleja, joten se ei välttämättä ole homeen kasvun kannalta heikoin rakenne. ECOSAFE-vertailurakenteen perusteella (ei kuvassa), voidaan lisäksi tehdä havainto, että eristeen suurempi kosteuskapasiteetti madaltaa kosteustasoa tuulensuojalevyn takapinnassa.

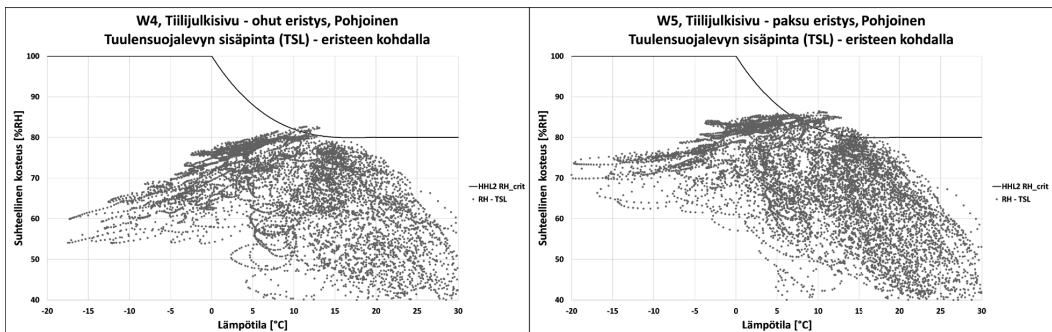
Puu- ja tiilijulkisivujen välinen ero jää lopulta pieneksi, mutta näkyy etenkin ohuemmalla eristepaksuudella puujuulkisivun eduksi. Tämä kertoo tutkimusjaksolle osuneesta verrattain vähäisestä viistosateen määrästä, koska viistosaderasitettu tiilijulkisivu oletettavasti olisi vastaavaa puujuulkisivua kosteammissa olosuhteissa. Viistosateen negatiivista vaikutusta lisäksi kompensoi tiilen suurempi lämpökapasiteetti, joka vähentää rakenteen jäähtymistä yöaikaan etenkin kylminä syysöinä, joita usein edeltää aurinkoinen päivä.

3.2 Homehtumiselle otollisten olosuhteiden esiintyvyys

Tuulensuojan sisäpinnan toteutuneille olosuhteille laskettiin homeindeksit Suomalaisen homemallin [2] avulla. Homeindeksit eivät odotetusti nousseet juurikaan ja niiden avulla rakenteita ei pysty asettamaan paremmuusjärjestykseen. Täytyy muistaa, että toteutetut rakenteet ovat varsin tyypillisiä ja edustavat Suomessa käytettyjä rakennustyyppisiä. Niiden ulkopinnan homehtuminen ei nykyilmastossa ole odotettavissa saatikka toivottavaa, mutta

ilmastonmuutoksen myötä olosuhteiden kriittisyys tulee kasvamaan ja nyt heikoiten toimivat rakenteet todennäköisesti muuttuvat ongelmarakenteiksi.

Suomalaisen homemallin mukaisesti laskettavassa homeindeksin kaavassa voidaan tunnistaa kriittinen kosteustaso (RH_{crit}), jonka jälkeen homehtuminen on mahdollista. Kriittinen kosteustaso riippuu materiaalin homeutumisherkkyysluokasta ja lämpötilasta. Kriittisen kosteustason ylittyessä alkaa homeen itämisaika, joka täyttyy, kun saavutetaan homeindeksin arvo 1. Kuvassa 4 on esitetty rakenteiden W4 ja W5 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittapistepilvi ja kipsituulensuojalevyn homeutumisherkkyysluokan 1 kriittisen kosteustason käyrä. Mitä enemmän pisteitä on kriittisen kosteustason käyrän yläpuolella, sitä vähemmän rakennetyyppi kestää ilmaston muuttumisen aiheuttamaa kosteustason nousua. Myös mitä kauempana piste on kriittisen kosteustason käyrästä, sitä nopeammin homeindeksi alkaa kehittyä.



Kuva 4. Tiiliverhoillun ohuesti eristetyin rakenteen W4 ja vastaavan paksuun eristetyin rakenteen W5 lämpö- ja kosteustasot koko tutkimuksen ajalta.

Kuvan 4 pistepilvien kriittisen kosteustason ylittävien pisteiden lukumäärä ja sen perusteella laskettu tuntimäärä eri rakennetyypeissä on esitetty taulukossa 1. Lisäksi on laskettu alkuvuoden 2021 ajalta suhteellisen kosteuden ja lämpötilan keskiarvot.

Taulukko 1. Kriittisten kosteusolosuhteiden esiintyminen tuulensuojalevyn sisäpinnassa

Rakenne	W1	W2	W3	W4	W5
Homeutumisen kannalta kriittisen rajan RH_{crit} ylittävät mittaukset koko tutkimusajalta	459 h	24 h	444 h	42 h	328 h
Keskiarvotettu suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn sisäpinnassa ajalta 1.1.-30.4.2021	66 %RH	59 %RH	67 %RH	67 %RH	79 %RH
Keskiarvotettu lämpötila tuulensuojalevyn sisäpinnassa ajalta 1.1.-30.4.2021	3,8 °C	4,5 °C	3,4 °C	5,3 °C	2,0 °C

Taulukon 1 tuloksissa havaitaan sama tulos kuin kuvan 3 kuvaajista. Ohuempi eristepaksuus pitää lämpötilan tuulensuojalevyn sisäpinnassa selvästi korkeampana, joka puolestaan laskee ilman suhteellista kosteutta. Suurempi lämpövuoto talvisin korostaa tätä ilmiötä, joka näkyy selvästi taulukon 1 tuloksissa.

Kaikkien rakenteiden osalta ilman absoluuttinen kosteuspitoisuus tuulensuojalevyn takapinnassa on hyvin lähellä ulkoilman olosuhdetta. Siksi hyvän kosteusteknisen toiminnan takaamiseksi suuremmilla eristevahvuuksilla tuulensuojalevyn tulisi olla lämpöä eristävä, jotta olosuhteet levyn sisäpinnassa eivät yltäisi homeen kasvun kannalta kriittisiin olosuhteisiin. Ilmaston muuttuessa kosteuskuormaltaan rankemmaksi, tämä vaatimus tulee jatkossa korostumaan.

Taulukon 1 tuloksista ja kuvasta 4 havaitaan myös tiilijulkisivun korkeat kosteustasot viileänä aikana. Homehtumisen kannalta kriittinen kosteustaso RH_{crit} nousee kylmällä ja siksi eri julkisivutyypin välillä ei näy homehtumiselle otollisten olosuhteiden näkökulmasta eroa. Keskiarvolämpötilat ja suhteelliset kosteudet kuitenkin osoittavat, että tiilijulkisivullinen rakenne on pääosin kosteammassa ja viileämmässä oloissa. Jos erot rakenteiden välillä pysyvät samoina, mutta koko rakenteen lämpötila ilmastomuutoksen myötä leudontuvien talvien mukana nousee (kuvan 4 pistepilvet siirtyvät oikealle), tulee tiilijulkisivun kanssa ongelmat vastaan paljon puujulkisivua aikaisemmassa vaiheessa.

4. Yhteenvedo

Business Finlandin ja yritysten rahoittamassa Future Spaces -hankkeessa tutkitaan mineraalivillaeristeisten seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa koerakennuksilla, jossa rakenteisiin kohdistuu nykyilmaston mukainen säärasitus ja yhtäläinen sisäilman olosuhde. Vertailtavana oli tiili- ja puujulkisivu sekä kaksi eri eristepaksuutta puurunkorakenteisena ja yksi paikalla muurattu tiili-villa-tiili rakenne.

Tutkimuksessa havaittiin, että eristekerroksen paksuuntuminen vaikuttaa merkittävästi kosteusolosuhteiden kriittisyyteen lähellä rakenteen ulkopintaa, tuulensuojalevyn eristeen puoleisessa pinnassa. Vastaavasti havaittiin, että tiilijulkisivullisissa rakenteissa kosteustasot olivat korkeammat kuin puujulkisivullisissa rakenteissa. Homehtumisriskiin julkisivumateriaalilla ei ollut merkittävää vaikutusta, koska kosteat olosuhteet painottuvat viileään aikaan, jolloin homeen kasvu on kosteustasosta riippumatta vähäistä.

Absoluuttinen kosteus lähellä rakenteen ulkopintaa riippuu lähinnä ulkoilman olosuhteista. Näin ollen rakenteiden kosteustekninen toiminta paranee, kun kriittisiksi katsotut osat rakenteesta ovat lämpimämmässä. Käytännössä suositeltavin ratkaisu on lämpöä eristävän kerroksen asentaminen tuulensuojalevyn ulkopintaan tai lämpöä eristävän tuulensuojamateriaalin käyttö. Vertailu toiseen samaan aikaan käynnissä olevaan ECOSAFE -hankkeen elementtiin osoittaa, että kosteustasoa pystyy vähäisesti alentamaan myös lämmöneristeen kosteuskapasiteettia lisäämällä.

Tutkimuksessa oli käytössä vain kipsituulensuojalevy, joten eri tuulensuojamateriaalien toimivuutta käytännössä ei pystytä arvioimaan näiden tulosten perusteella. Kaikissa rakenteissa on tähän asti ollut ehjä höyrynsulkukalvo, joten rakenteiden vikasietoisuutta ei vielä ole saatu testattua. Tiili-villa-tiili rakenteen ominaisuudet olivat monilta osin poikkeavat vastaaviin puurunkoisiin rakenteisiin verrattuna. Kyseisen rakenteen korkeammat kosteustasot eivät automaattisesti tarkoita huonompaa kosteusteknistä toimivuutta, koska rakenne ei sisällä lainkaan herkästi homehtuvia materiaaleja. Hanke jatkuu ja ainakin vikasietoisuutta pyritään testaamaan tuottamalla hallittua sisäilman kosteuden vuotoa rakenteeseen.

Lähdeluettelo

- [1] Tuikka, J. 2019. Seinärakenteiden U-arvon in-situ mitattavuuden laskennallinen arviointi
- [2] Vinha, J. Viitanen, H. Lähdesmäki, K. Peuhkuri, R. Ojanen, T. Salminen, K. Paajanen, L. Strander, T. Iitti, H. Julkaisematon. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi

Mineraalivillaeristeisten yläpohjarakenteiden koerakennuskokeet Future Spaces -hankkeessa

Eero Tuominen, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmä tekee osana Business Finlandin ja yritysten rahoittamaa Future Spaces -hanketta erilaisten yläpohjarakenteiden tutkimusta. Tutkimuksessa verrataan Hervannan koerakennuksiin asennettujen erilaisten yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa. Kahteen koerakennukseen asennetaan yhteensä kuusi erilaista noin 1,8x4m² tuuletustilallista harjakattoista yläpohjaelementtiä, jotka on anturoitu suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seuraamiseksi rakenteen eri kerroksissa. Kaikkiaan elementeissä on vertailtavana kaksi eristevaihtoehtoa: mineraalivilla ja sellueriste, sekä kaksi eri aluskatevaihtoehtoa molemmilla eristevaihtoehtoilla: lämpöä eristävä ja kalvomainen aluskate. Lisäksi on kaksi mineraalivillaeristeistä yläpohjaelementtiä, joissa on molemmissa lämpöä eristävä aluskate. Näissä elementeissä on rajoitetut ilmanvaihtoreitit ja tarkoituksena on verrata eri ilmanvaihtuvuuksien vaikutuksia tuuletustilan olosuhteisiin. Artikkelia kirjoitettaessa mittadataa on kertynyt kolmesta mineraalivillaelementistä, joissa on mukana molemmat aluskatevariaatiot ja yksi rajoitetun ilmanvaihdon elementti. Elementtien välistä rakennusfysikaalista toimintaa on verrattu toisiinsa. Kaikkiin elementteihin vaikuttaa sama sisäilman olosuhde ja ulkoilman sää. Kosteusteknisesti parhaiten toimiva rakenne tähän mennessä kertyneen datan perustella on rajoitetun ilmanvaihdon elementti, jossa oletettavasti on kaikista kolmesta rakenteesta vähäisin ilmanvaihtuvuus.

1. Johdanto

Tampereen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Rakennusfysiikan tutkimusryhmä on osana laajempaa tutkimuskonsortiota saanut Business Finlandilta rahoitusta Future Spaces -hankkeelle. Osana hanketta tutkitaan koerakennukseen rakennettavien yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa.

Koerakennuksiin voidaan asentaa etelä- ja pohjoisjulkisivuille noin 1,2 x 2,5 m² seinäelementtejä yhteensä 24 kpl ja noin 1,8 x 4 m² harjakattoelementtejä yhteensä 6kpl. Tässä hankkeessa tutkitaan yhteensä kymmentä RAPID U -hankkeessa rakennettua seinäelementtiä ja kuutta kattoelementtiä. Artikkelin kirjoitushetkellä mittadataa on ollut käytettävissä kolmesta kattoelementistä. Seinäelementtejä koskeva tutkimus on raportoitu osana toista artikkelia.

Kattoelementeissä on varioitu kahta eri eristelaatua, jotka ovat yleisesti käytössä Suomessa: kivimineraalivilla ja sellueriste. Eristeet on valittu siten, että eristeen kosteuskapasiteeteissa on eroavaisuutta. Lisäksi on varioitu aluskatemateriaalia, koska aiemman FRAME-hankkeen [1] tutkimustulosten valossa tiedetään, että aluskatemateriaalilla voi olla merkittävä vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tämän lisäksi on rakennettu elementtejä, joissa tavanomaisen räystäös- ja harjatuuletuksen tilalla on ilmanvaihtoputket, joiden ilmavirtauksia pyritään mittaamaan ja tarvittaessa säätämään, jotta saadaan tietoa eri ilmanvaihtuvuuksien vaikutuksista yläpohjan tuuletustilan olosuhteisiin.

Elementtien kosteusteknistä toimintaa havainnoidaan kattavalla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden anturoinnilla, jotta rakennetyyppien välisiä eroja kosteusteknisessä toiminnassa voidaan verrata. Rakenteen sisäisten olosuhteiden lisäksi seurataan sisäilman olosuhteita ja ulkoilman säätä Vaisalan sääaseman avulla.

2. Tutkittavat elementit

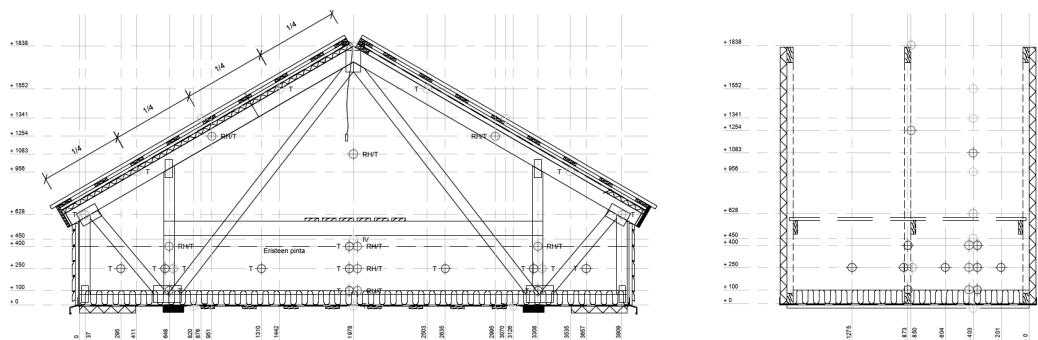
2.1 Rakennetyypit

Tutkittavat rakenteet ovat tavanomaisia naulalevyristikollisia yläpohjia. Rakenteissa on sisäpinnassa harvalaudoitus, höyrynsulkumuovi, 15 mm havuvanerilevy, ristikon alapaarteiden väliin asennettu 100 mm levyriste ja levyristeen päälle puhaltamalla asennettu irtoeriste, jonka paksuus on valittu siten, että laskennallisesti saavutetaan U-arvo 0,09 W/m²K. Ristikoiden yläpaarteiden päälle on asennettu aluskate, korokeripa, ruodelaudoitus ja trapetsipeltikate. Yläpohjan seinärakenne puolestaan on puuverhoilu, tuuletusväli ja tuulensuojalevy. Rakenteet on tuuletettu aluskatteen ja tuulensuojalevyn välisellä raolla räystäällä ja harjalla eri lappeiden aluskatteiden reunojen välisellä raolla. Tuuletus rakennuksen pituussuunnassa on estetty osastoimalla eri elementit toisistaan 50 mm XPS levyllä, joka on tiivistetty höyrynsulkumuoviin, tuulensuojalevyyn ja aluskatteeseen.

Rajoitetun ilmanvaihdon elementeissä tuuletusraot on tukittu XPS-levyillä ja uretaanivaahdolla. Ilmanvaihtoreitit on tehty elementin molempien ristikkovälien puoliväliin 100 mm ilmanvaihtoputkesta sekä räystäällä että harjalla. Yhteensä 0,5 m pitkiä ilmanvaihtokanavia on 6 kpl / elementti.

Tässä artikkelissa käsitellään kolme jo asennettua rakennetta, joissa kaikissa on mineraalivillaeriste. Erona rakenteissa on joko aluskate tai tuuletus: yhdessä rakenteessa on kalvomainen diffuusioavoin muovaluskate (YP2, kuva 1 oikea lape) ja kahdessa eristävä 30 mm XPS-levystä toteutettu aluskate. Toinen eristävällä aluskatteella varustettu elementti on toteutettu täysin kalvoaluskatetta vastaavilla tuuletusreiteillä (YP1, kuva 1 vasen lape) ja toinen on toteutettu yllä esitellyllä ilmanvaihdon tuuletuskanavistolla (YP3).

Tutkittavien elementtien eristemateriaalit on saatu eristevalmistajilta ja irtoeristeet on asennettu valtuutetun asentajan toimesta. Elementtien rakentaminen on tehty ostopalveluna. Anturit ja levyristeet on asentanut Tampereen yliopiston tiloissa tutkimusapulainen Jaakko Hietikko.



Kuva 1. Tutkittujen elementtien rakenneleikkaus ja anturointi

2.2 Anturointi

Aluskatetta ja eristemateriaalia edustavat elementit anturoidaan toisiaan vastaavasti kuvan 1 mukaisesti. Rajoitetun ilmanvaihdon elementeissä antureita on merkittävästi vähemmän; anturointi on keskitetty mittaamaan tuuletustilan olosuhteita. Näissä elementeissä ilmavirtauksia mitataan paitsi elementin keskeltä myös ilmanvaihtokanavista. Jokaisen kanavan puolivälissä on HD403TS2 kuimalanka-anemometri, jolla pyritään mittaamaan ilmavirtausta putkessa. Vastaava anturityyppi on käytössä jokaisen eri elementin tuuletustilan keskellä kuvan 1 mukaisesti.

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavat anturit on pääosin sijoitettu yhteen ristikkoväliin, jotta saadaan mahdollisimman tarkkaa tietoa lämpö- ja kosteusolosuhteista yksittäisessä ristikkovälissä. Lämpötilaa mitataan jonkin verran myös toisesta ristikkovälisestä, tavoitteena havainnoida mahdollista sisäisen konvektion aiheuttamaa lämpötilakentän epälineaarisuutta eristeen ja elementin sisällä. Anturityypeinä on suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaauksessa käytetty Vaisalan HMP110 -antureita ja pelkän lämpötilan mittaauksessa TI LM355 -puolijohdeantureita. Yhteensä rajoittamattoman ilmanvaihdon elementeissä on 8 kpl HMP110 -antureita, 34 kpl TI LM355 -antureita ja yksi ilmavirtausanturi.

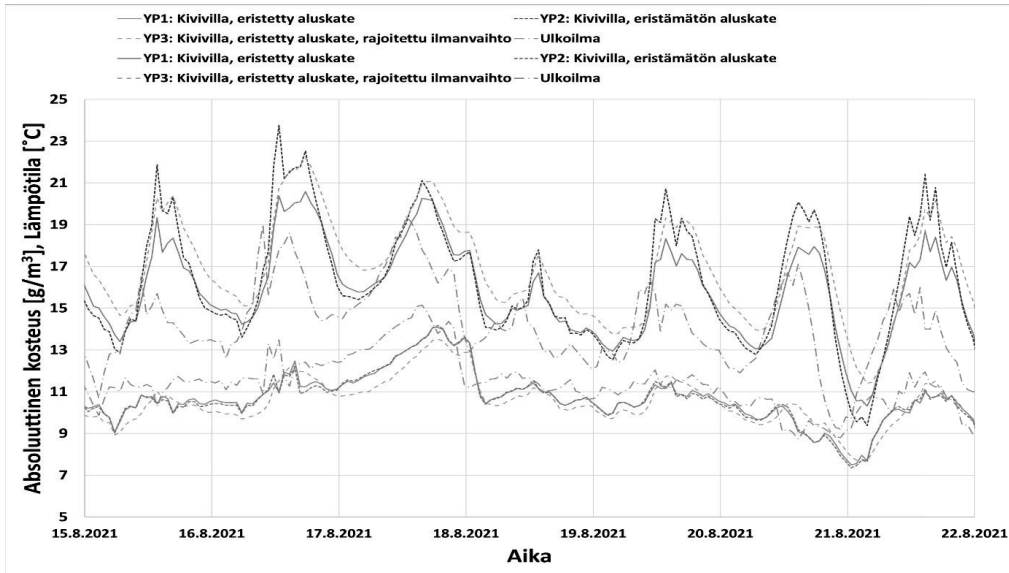
3. Tulokset

Tässä artikkelissa mittaustulosten esittely keskittyy tuuletustilan olosuhteisiin, koska niissä eri tuuletusratkaisujen ja aluskatteiden erot tulevat selkeimmin näkyviin. Tuuletustilan olosuhteiden odotetaan laskennan tulosten perusteella olevan kriittisiä hyvin eristetyn yläpohjan tapauksessa, kun rakenteen läpi virtaava lämpö ei riitä pitämään tuuletustilaa selkeästi ulkoilmaa lämpimämpänä. Koska tuuletustilassa on avoin eristepinta, ei tuuletustilassa tulisi esiintyä homeen kasvulle otollisia olosuhteita; mahdollinen homeen kasvu avoahuokaisen eristeen yläpinnassa tarkoittaa itiöiden verrattain vapaata kulkeutumista rakenteen sisään ja sieltä edelleen ilmavuotoreittejä pitkin sisäilmaan.

3.1 Ulkoilman ja tuuletustilan väliset erot

Absoluuttinen kosteus ja lämpötila eri elementtien tuuletustilassa ja ulkoilmassa on esitetty kuvassa 2. Kuvasta nähdään, että tuuletustilan olosuhteet seuraavat ulkoilman olosuhdetta muutaman tunnin viiveellä. Lämpötila tuuletustilassa on jokseenkin ulkoilmaa korkeampi kaikilla eri elementeillä ja absoluuttinen kosteus puolestaan matalampi. Matalampi absoluuttisen kosteuden taso tarkoittaa käytännössä, että ulkoa tuuletustilaan virtaavasta ilmasta sitoutuu kosteutta tuuletustilan kosteutta sitoville pinnoille. Kuvasta voidaan myös havaita, että absoluuttinen kosteus eri aluskatevariaatioilla (YP1 ja YP2) on täysin sama, josta voidaan arvioida ilmanvaihtuvuuden olleen yhtäläisen. Eristetyllä aluskatteella on kuitenkin saavutettu korkeammat lämpötilat yöaikaan päivälämpötilan jäädessä alhaisemmaksi. Rajoitetun

ilmanvaihdon elementissä kosteustaso on pääosin muita alhaisempi ja lämpötila lähes jatkuvasti korkeammalla, mikä viittaisi muita elementtejä vähäisempään ilmanvaihtuvuuteen.



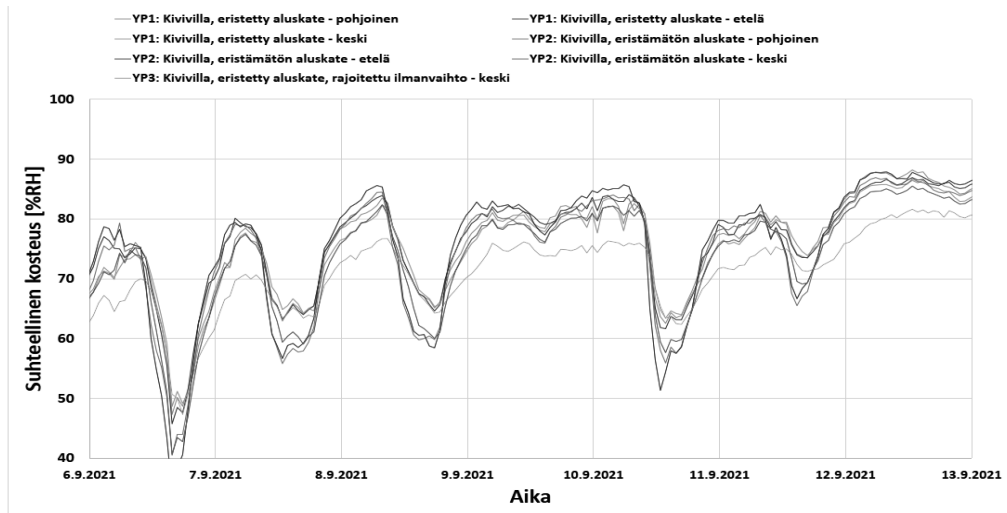
Kuva 2. Absoluuttinen kosteus ja lämpötila tuuletustilassa ja ulkoilmassa. Absoluuttiset kosteudet ovat neljä alempaa käyrää.

3.2 Elementtien väliset erot

Edellisen luvun mukaisesti ulkoilman absoluuttinen kosteus on pääosin tuuletustilan ilman kosteutta suurempi. Se johtaa yhdessä lämpötilaerojen kanssa siihen, että tuuletustilan suhteellinen kosteus pysyy kaikilla rakenteilla lähes koko ajan ulkoilman suhteellista kosteutta matalampana. Erot suhteellisissa kosteudessa puhalluseristeen yläpinnasta mitattuna on esitetty kuvassa 3. Kuvasta voidaan havaita rajoitetun ilmanvaihdon elementin yöaikaiset merkittävästi muita elementtejä matalammat suhteellisen kosteuden tasot, jopa 10 %-yksikköä.

Muissa elementeissä on keskialueen lisäksi anturi etelä- ja pohjoisreunalla (kuva 1). Kuvasta 3 voidaan havaita, että suhteellinen kosteus on eri aluskatteilla yöaikaan samalla tasolla, mutta päivällä eristämättömällä aluskatteella saavutetaan matalampi suhteellinen kosteus. Tämä on seurausta aiemmin havaitusta päiväaikaisesta lämpötilan noususta. Vähäiset muutaman %-yksikön erot voidaan havaita myös etelä- ja pohjoispuolelle välillä, mutta eroavaisuus muuttuu vuorokaudenaikojen mukana eikä tuota siten etelä- ja pohjoispuolelle merkittävää eroa. Vastaavat havainnot voidaan tehdä ristikon yläpaarteisiin asennetuista antureista, mutta niissä suhteellisen kosteuden erot jäävät tätäkin pienemmiksi todennäköisesti parrepuun eristettä suuremman kosteuskapasiteetin ja lämpökapasiteetin vuoksi.

Nyt käytössä olevassa kesä- ja syyskauden datassa on tilanne, että rakenne on kesän jäljiltä kuiva. Tässä tilanteessa viilenevä ulkoilma ja yöaikaiset korkeat ilmankosteudet aiheuttavat yläpohjan kostumista. Elementtien väliset erot voivat tasoittua, kun talven jäljiltä tullaan tilanteeseen, jossa rakenteeseen mahdollisesti kertyneen kosteuden tulee poistua. Ylipäänsä mittausjaksolle ei osunut merkittävää määrää hyvin kylmiä ja kosteita ulko-olosuhteita, joka tasoittanee elementtien välisiä eroja.

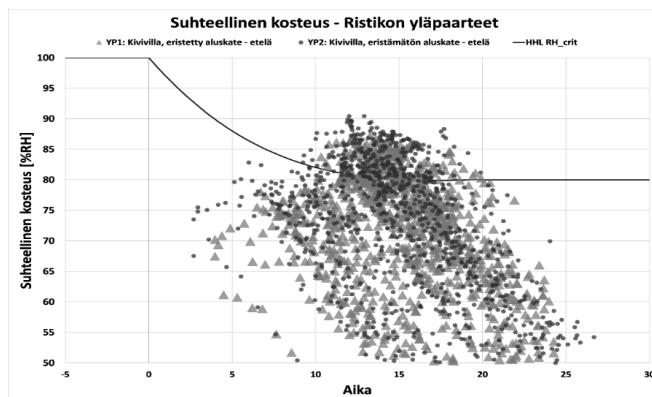


Kuva 3. Suhteellinen kosteus eristeen pinnalla elementin etelä- ja pohjoisreunalla sekä keskellä.

3.3 Olosuhteiden kriittisyys

Ristikoiden yläpaarteesta mitatuille olosuhteille laskettiin homeindeksit Suomalaisen homemallin [2] avulla. Homeindeksit eivät odotetusti nousseet juurikaan ja niiden avulla rakenteita ei pysty asettamaan paremmuusjärjestykseen. Osittain matalat homeindeksit ovat seurausta lyhyestä laskentajaksosta. Täytyy myös huomioida, että rakenteiden homehtuminen ei nykyilmastossa ollut odotettavissa, mutta ilmastonmuutoksen myötä olosuhteiden kriittisyys tulee kasvamaan ja tämä on ongelma erityisesti heikoiden nykyilmastossa toimiville ratkaisuille.

Suomalaisen homemallin mukaisesti laskettavassa homeindeksin kaavassa voidaan tunnistaa kriittinen kosteustaso (RH_{crit}), jonka jälkeen homehtuminen on mahdollista. Kriittinen kosteustaso riippuu materiaalin homehtumisherkkyysluokasta ja lämpötilasta. Kuvassa 4 on esitetty rakenteiden YP1 ja YP2 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittapistepilvi ja ristikon yläpaarteen homehtumisherkkyysluokan 1 kriittisen kosteustason käyrä. Mitä enemmän pisteitä on kriittisen kosteustason käyrän yläpuolella, sitä vähemmän rakennetyyppi kestää ilmaston muuttumisen aiheuttamaa kosteustason nousua.



Kuva 4. Eristävällä ja kalvomaisella aluskatteella varustettujen yläpohjien lämpö- ja kosteustasot koko tutkimuksen ajalta.

Kuvan 4 pistepilvien kriittisen kosteustason ylittävä pisteiden lukumäärä ja sen perusteella laskettu tuntimäärä eri rakennetyypeissä on esitetty taulukossa 1. Lisäksi on laskettu suhteellisen kosteuden ja lämpötilan keskiarvot tutkimusajalta.

Taulukko 1. Kriittisten kosteusolosuhteiden esiintyminen yläpaarteissa. YP3 osalta yläpaarteesta ei ole suhteellisen kosteuden mittaustuloksia ja laskenta on tehty tuuletustilan kosteuden perusteella, joka muiden elementtien perusteella on paarteen tilannetta hivenen kriittisempi.

Rakenne (P = pohjoispuoli, E = eteläpuoli)	YP1 - P	YP1 - E	YP2 - P	YP2 - E	YP3
Homehtumisen kannalta kriittisen rajan RH _{crit} ylittävät mittaukset	188 h	188 h	227 h	271 h	73 h
Keskiarvotettu suhteellinen kosteus	69,2 %RH	68,7 %RH	70,7 %RH	71,3 %RH	65,7 %RH
Keskiarvotettu lämpötila	17,3 °C	17,3 °C	16,6 °C	16,6 °C	18,5 °C

Taulukon 1 ja kuvan 4 tuloksista havaitaan, että eristävällä aluskatteella saadaan tuotettua kosteusturvallisemmat olosuhteet yläpohjan tuuletustilaan. Rajoitetun ilmanvaihdon yläpohjassa kosteusturvallisuus on muita paremmalla tasolla ja syy lienee pienempi ilmanvaihtuvuus. Ilmanvaihtuvuuden rajoittaminen sisältää riskin, koska esimerkiksi Antti Forssin diplomityön [3] laskennallisista tuloksista nähdään, että ilmanvaihtuvuuden laskettua rakenteelle ominaisen rajan alle, alkavat kosteusolosuhteet muuttua uudelleen kriittisempään suuntaan.

Ilmaston muuttuessa kuvan 4 pistepilvet todennäköisesti siirtyvät oikealle ja ylös, jolloin olosuhteiden kriittisyys kasvaa nykyisestä. Siksi olisi tärkeää, että nykytilanteessa ei oltaisi vielä aivan kriittisellä rajalla kiinni.

4. Yhteenveto

Business Finlandin ja yritysten rahoittamassa Future Spaces -hankkeessa tutkitaan ristikkorakenteisten tuulettuvien yläpohjaelementtien kosteusteknistä toimintaa koerakennuksilla, jossa rakenteisiin kohdistuu nykyilmaston mukainen säärasitus ja yhtäläinen sisäilman olosuhde. Tässä artikkelissa käsiteltiin ensimmäisiä mittaustuloksia, joissa on mukana kaksi aluskatevariaatiota: lämpöä eristävä ja kalvomainen, sekä yksi lämpöä eristävällä aluskatteella varustettu rajoitetun ilmanvaihdon elementti.

Tutkimuksessa havaittiin, että lämpöä eristävällä aluskatteella on positiivinen vaikutus tuuletustilan olosuhteisiin. Lisäksi havaittiin, että rajoitetun ilmanvaihdon elementtiin muodostui kosteusturvallisempi olosuhde, joka todennäköisesti on seurausta vähäisemmästä ilmanvaihtuvuudesta.

Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J. et al. Tutkimusraportti 159. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa
- [2] Vinha, J. Viitanen, H. Lähdesmäki, K. Peuhkuri, R. Ojanen, T. Salminen, K. Paajanen, L. Strander, T. Iitti, H. Julkaisematon. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi
- [3] Forss, A. 2021. Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

A4. Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja hyvät työmaakäytännöt

Kokemuksia suunnittelun ja työmaan laadunvarmistuksen ohjauksesta kosteudenhallinnan näkökulmasta

Timo Turunen
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Ympäristöministeriön kosteusasetuksen voimaantulon myötä vuonna 2018 kosteudenhallinnasta huolehtiminen muuttui velvoittavaksi toimenpiteeksi. Asian ”uutuuden” vuoksi käytännössä on tällä hetkellä huomattavia tilaaja- ja paikkakuntakohtaisia eroja. Kosteudenhallintaan on olemassa kaksi jonkin verran toisistaan poikkeavaa toimintamallia eli kosteusasetuksen mukainen toimintamalli ja Kuivaketju10-toimintamalli. Niiden sisällön ja erityispiirteiden tuntemusta on lisättävä tilaajien, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden keskuudessa kosteudenhallintaprosessin sujuvoittamiseksi. Hankkeen kosteudenhallintakoordinaattorin johdolla on tunnistettava yleisissä suunnitteluohjeissa olevat pienet epätarkkuudet ja jalkautettava tilaajan hankekohtaiset vaatimukset niin suunnittelijoille kuin urakoitsijoille. Työmaan kosteudenhallintaa koskevat vaatimukset, erityisesti laadunvarmistustoimenpiteet, on esitettävä yksityiskohtaisesti urakkalaskenta-asiakirjoissa. Hankkeen osapuolten kosteudenhallintaosaamista on lisättävä, jotta hankkeen kosteudenhallinnasta huolehtiminen ei jää yksinomaan kosteudenhallintakoordinaattorin aktiivisuuden ja osaamisen varaan.

1. Johdanto

Rakennushankkeen kosteudenhallintaa koskevat määräykset julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1999 Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C2 [1]. Siinä todetaan, että rakennusaineet ja -tarvikkeet sekä rakennusosat on suojattava haitalliselta kastumiselta ja että rakennuskosteuden on annettava kuivua ennen kuin rakenteet peitetään. Kosteudenhallinta siirtyi velvoittavien säädösten piiriin vuoden 2018 alussa, kun ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (ns. kosteusasetus) [2] astui voimaan. Samanaikaisesti kumottiin rakentamismääräyskokoelman osa C2. Ennen asetuksen voimaantuloa kosteudenhallintaa ohjattiin 2010-luvun puolivälissä käyttöönotetun Kuivaketju10-toimintamallin [3] tai 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen alkupuolella julkaistun Terve Talo -toimintamallin [4] pohjalta, mikäli tilaaja niiden noudattamista edellytti. Molemmat mallit ovat edelleen käytössä. Jo Terve Talo -toimintamallissa pääurakoitsijan edellytettiin laativan hyvin pitkälti nykyisten ohjeiden mukainen työmaan kosteudenhallintasuunnitelma ja annettiin ohjeita suunnittelunohjaukseen. kosteusteknisestä toimivuuden osalta.

Sekä kosteusasetuksen että Kuivaketju10-toimintamallin myötä kosteudenhallinnan tärkeys on konkretisoitunut, ja tilanne on parantunut viime vuosina yleisellä tasolla: Hankkeissa laaditaan ”pakolliset” dokumentit eli rakennushankkeen kosteudenhallintaselvitys ja työmaan kosteudenhallintasuunnitelma tai käytetään Kuivaketju10:n riskilistoja niihin sisältyvine todentamistoimenpiteineen. Ne jäävät kuitenkin helposti liian yleisiksi, eikä hankkeen kosteusteknisesti kriittisiä asioita tunnisteta läheskään aina riittävän ajoissa.

Tässä artikkelissa tarkastellaan lukuisten hankkeiden kosteudenhallintakoordinaattorin tehtävien hoitamisessa saatuja kokemuksia ja esitetään niihin perustuen ehdotuksia nykykäytäntöjen terävöittämiseksi.

2. Kosteudenhallintaprosessi

2.1 Erilaiset toimintamallit

Ympäristöministeriön kosteusasetuksen mukaisessa toimintamallissa tilaajan on huolehdittava rakennushankkeen kosteudenhallintaselvityksen laadinnasta. Siinä kuvataan vaatimukset kosteudenhallinnalle hankkeen suunnittelu-, rakentamis-, valmistumis- ja käyttöönottovaiheessa sekä esitetään hankkeen kosteudenhallinnan valvonnasta vastaava henkilö [5]. Selvitys tehdään yleensä suunnittelun ollessa yleissuunnittelu- tai rakennuslupavaiheessa. Työmaan kosteudenhallintasuunnitelma laaditaan kosteudenhallintaselvityksen perusteella. Suunnitelman laatimisesta huolehtii työmaan vastaava työnjohtaja siten, että se on käytettävissä ennen työmaan aloitusta. Rakennusalan ammattilaistenkin keskuudessa esiintyy yhä edelleen epäselvyyttä näiden asiakirjojen suhteen: Kaikki eivät ymmärrä, että rakennushankkeen kosteudenhallintaselvitys on eri dokumentti kuin työmaan kosteudenhallintasuunnitelma. Esimerkiksi rakenne- ja rakennusfysikaalisen suunnittelun tehtäväluettelossa RAK18 [6] on hieman epätarkkuutta käsitteiden ja kosteudenhallintaa koskevien asiakirjojen laatijan suhteen.

Kuivaketju10-toimintamallin käyttämisestä hankkeessa päättää tilaaja. Tilaaja kiinnittää hankkeeseen kosteudenhallintakoordinaattorin sekä sopii suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden kanssa, että hanke toteutetaan Kuivaketju10-toimintamallin mukaisesti. Suunnittelijat tarkentavat Kuivaketju10-riskilistan ja -todentamisohjeen hankkeen erityispiirteisiin. Urakoitsijat todentavat ja dokumentoivat riskejä sisältävien kohtien onnistuneen toteutuksen. Koordinaattori valvoo ja ohjaa toimintamallin toteuttamista koko rakennusprosessin ajan. [3]

Tilaaja voi siis valita, kumpaa edellä mainittua mallia hankkeessa käytetään. Tarkoituksena on ollut, että jompaakumpaa mallia noudattamalla saavutetaan hyväksyttävä menettelytapa. Rakennusvalvontaviranomaisten kosteudenhallintaa koskevat käytännöt vaihtelevat kuitenkin suuresti eri puolilla Suomea. Esimerkiksi Kuivaketju10-toimintamallin dokumentoitukaan käyttö ei kaikissa kunnissa yksinomaan riitä, vaan sen ohella on laadittava kosteusasetuksen mukaista sisältöä suppeampi kosteudenhallintaselvitys ja liitettävä siihen toimintamallin sähköisestä järjestelmästä tulostettu tilaamisvaiheen raportti [7]. Lisäksi joissakin Kuivaketju10-hankkeissa on edellytetty erillisen kosteudenhallinnan loppuraportin laadintaa. Toisaalta on olemassa lähes päinvastainen vaatimus: Mikäli Kuivaketju10-toimintamallia ei oteta käyttöön, tulee hankkeeseen laatia oma vastaava kosteudenhallinnan toimintamalli ja -selvitys. Lupaa haettaessa toimitetaan rakennusvalvontaan kosteudenhallinnan toimintamalli sekä ulkopuolisen asiantuntijan lausunto rakennushankkeen kosteudenhallintaselvityksestä [8].

Erilaisista menettelytavoista ja asiakirjojen laadintavelvoitteista aiheutuu helposti suunnittelijoille ja urakoitsijoille ylimääräisiä haasteita hankkeen kosteudenhallinnan toteutuksessa. Tilaajan on siksi syytä selkeästi kertoa eri suunnittelualojen ja kosteudenhallintakoordinoinnin tarjouspyyntöasiakirjoissa, mitä toimintamallia rakennushankkeen kosteudenhallinnassa käytetään ja mitä asiakirjoja rakennusvalvontaan pitää toimittaa.

2.2 Vaatimusten tarkentaminen kosteudenhallintasuunnitelmaohjeen avulla

Kosteudenhallintaselvitystä laadittaessa kaikki rakenneratkaisut eivät yleensä ole läheskään lopullisia, minkä vuoksi selvitykseen ei kyetä sisällyttämään riittävän tarkkoja vaatimuksia ja ohjeita työmaatoteutusta varten. Tämän vuoksi osa tilaajista teettää joko rakennusfysikaalisella suunnittelijalla tai kosteudenhallintakoordinaattorilla lisäksi erillisen työmaan kosteudenhallintasuunnitelman laadintaa koskevan ohjeen. Ohje on useimmiten urakkaohjelman

liitteenä sen velvoittavuuden lisäämiseksi. Ohjeessa kerrotaan yksityiskohtaiset vaatimukset esimerkiksi sääsuojan rakenteelle sekä pystytys- ja purkamisajankohdalle, betonin kosteudenmittauskohtien lukumäärälle ja mittaussyvyyksille, betonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvoille ennen päällystystä tai pinnoitusta, työmaan kuivumisolosuhteiden seurannalle sekä menettelylle vesivahingon sattuessa työmaalla.

Kosteudenhallintasuunnitelmaohjeen käytöstä on saatu hyviä kokemuksia ja sen on koettu vähentävän erimielisyyksiä tilaajan ja urakoitsijan välillä. Lisäksi työmaan kosteudenhallintaa koskevien vaatimusten yksityiskohtainen määrittely saattaa urakkatarjousten tekijät keskenään tasavertaiseen asemaan. Käytäntö on osoittanut, että kosteudenhallintaselvityksessä olevia yleispiirteisiä vaatimuksia varsinkin rakennusosien kastumisen estämisestä sääsuojan avulla ja betonin kosteuden mittaamisesta voidaan tulkita hyvin eri tavoin.

3. Suunnittelunohjaus

3.1 Ympäristöministeriön ja järjestöjen ohjeet

Kosteusasetuksen sisällön taustoittamiseksi ja selostamiseksi ympäristöministeriö julkaisi vuonna 2020 kosteusasetusta täydentävän ohjeen (ns. kosteusohjeen). Lisäksi alan järjestöt ovat viime aikoina laatineet useita kosteusteknistä suunnittelua ja kosteudenhallintaa käsitteleviä ohjeita. Niissä on jonkin verran tulkinnanvaraisuutta esimerkiksi vedeneristysvaatimusten osalta. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty muutamia ristiriitilanteita aiheuttaneita ohjeita.

Kosteusasetuksen [2] mukaan maanvastaisen ulkoseinän rakenteen on estettävä ympäröivän maan kosteuden sekä hulevesien haitallinen tunkeutuminen seinärakenteeseen vedeneristyksellä. Asetuksessa olevan vedeneristyksen määritelmän mukaan vedeneristyksen on kestävä jatkuvaa kastumista ja estettävä veden haitallinen tunkeutuminen rakenteeseen. Tällöin kyseessä on ns. jatkuva vedeneriste [9] (kuten bitumikermi). Kuitenkin normaaleissa maaperän olosuhteissa, joissa rakennuksen maanvastaisen seinän vierustalla ja rakennuksen alla on toimiva salaojitusjärjestelmä, voidaan käyttää epäjatkuvia vedeneristeitä kuten perusmuurilevyä [5]. Sen käyttöä jopa suositellaan korkeintaan yhden kerroksen korkuisissa maanvastaisissa seinissä [10]. Asetuksen ja ohjeiden välisen tulkinnanvaraisuuden vuoksi suunnittelun alussa on määriteltävä, millaista vedeneristystapaa hankkeessa käytetään.

Rakennusselostuksissa ja rakennesuunnitelmissa esiintyy edelleen sitkeästi käsite kostea tila, vaikka sille ei ole olemassa kosteusteknisissä säädöksissä ja ohjeissa määritelmää. Tämä aiheuttaa usein sekaannusta vesi- ja viemärlaitteistoilla varustettujen tilojen lattian ja seinien vedeneristystarpeen määrittelyssä. Vedeneristystarpeen näkökulmasta tilat luokitellaan märkätiloihin ja lattiakaivolla varustettuihin tiloihin. Märkätilan määritelmä on esitetty kosteusasetuksessa [2] ja lattiakaivolla varustettavat tilat on määriteltä ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista [11]. Kummassakaan asetuksessa ei ole käsitelty lattiakaivolla varustetun tilan (pois lukien märkätilojen) vedeneristystarvetta, vaan asiaa on tarkasteltu esimerkiksi kosteusohjeessa [5] erityyppisten tilojen osalta. Ohjeen perusteella on pääteltävissä, että lattiakaivolla varustetun tilan lattiassa on oltava vedeneristys. Jotkin rakennusvalvonnat vaativat, että aina kun tilassa on lattiakaivo, on sen lattia vedeneristettävä tilan käyttötarkoituksesta riippumatta. Lähtökohtaisesti lattiakaivolla varustettujen tilojen (pois lukien märkätilojen) seiniä ei edellytetä vedeneristettäväksi. Koska esimerkiksi palvelurakennuksissa on monentyyppisiä vesipisteellä varustettavia tiloja, on suunnitteluvaiheessa tarkasteltava tilakohtaisesti tilojen lattian ja seinien vedeneristystarve samoin kuin päätettävä, tehdäänkö seinät levy- vai muurattuina rakenteina.

Betonin suhteellisen kosteuden mittausta koskeva RT-kortti [12] uudistui keväällä 2021. Siinä on aiemman ohjekortin tapaan esitetty normaalina maksimimittaussyvytenä 70 mm, mutta siinä mainitaan uutena asiana myös syvemmltä tehtävät mittaukset. Niitä on RT-kortin mukaan syytä tehdä kohteissa, joissa on esimerkiksi hyvin paksut rakenteet, hyvin tiiviit lattianpäällysteet, korkean vesi-sideainesuhteen betoni tai suuri varmuusmarginaali kriittisen kosteuspitoisuuden alittamiselle. Vaatimus syvemmltä tehtävistä mittauksista on epäselvyyden välttämiseksi mainittava kosteudenhallintaselvityksessä tai kosteudenhallintasuunnitelmaohjeessa, eli pelkkä viittaus RT-korttiin ei yksilöi mittausten toteutusta riittävän tarkasti.

RT-kortissa esitetään myös kokonaismittausepävarmuusluokat eri mittausten menetelmille ja annetaan lisäohjeita mittausepävarmuuden arviointiin. Päällystettävyyttä arvioitaessa mittaustulosta verrataan päällystysraja-arvoon mittausepävarmuus huomioon ottaen. Varsinainen päällystettävyydsmittaus pyritään tekemään vähintään tarkkuusluokalla ± 2 % RH. Tämän tarkkuusluokan käyttäminen asettaa mittalaitteen tarkkuudelle, mittaussuorituksen yksityiskohdille ja mittaolosuhteille erittäin tiukat vaatimukset, eikä sitä todennäköisesti pystytä aina saavuttamaan. Tämän vuoksi jouduttaneen useimmissa hankkeissa tekemään päällystettävyydsmittaukset tarkkuusluokkaa ± 4 % RH käyttäen. Mittausepävarmuus on luonnollisesti otettava huomioon ja ± 4 prosenttiyksikön suuruisen mittausrvirheen kuivumisaikaa pidentävä vaikutus on paksuissa betonirakenteissa useita viikkoja, jopa kuukausia. Tämä on tiedostettava jo hankkeen kokonaisuakataulua laadittaessa sekä osattava ottaa huomioon rakenneratkaisuja valittaessa.

3.2 Tilaajien omat suunnitteluohjeet

Tilaajat ovat esittäneet joissakin uudisrakennushankkeissa huomattavasti tiukempia vaatimuksia kuin mitä yleisissä suunnitteluohjeissa on. Tähän tilaajalla on hankkeen kustannuksista vastaavana tahona luonnollisesti oikeus. Erityisiä vaatimuksia asetetaan tyypillisesti betonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvolle ennen lattiapäällysteiden ja -pinnoitteiden asentamista, kosteuden mittaussyvyydelle, kosteudenmittausten lukumäärälle ja kohteessa käytettäville lattiapäällysteille sekä edellytetään rakennuksen vaipan lähes täydellistä ilmatiiviyyttä. Näihin suunnittelijat ja urakoitsijat eivät ole yleensä osanneet varautua, mistä aiheutuu hankkeen läpivienttiin kitkaa. Vaatimukset on siten tuotava selkeästi esiin heti hankkeen alussa ja varmistettava, että suunnittelijat ovat ne ymmärtäneet. Tilaajan pitää kuitenkin tiedostaa tiukkojen vaatimusten rakentamiskustannuksia lisäävä vaikutus.

Betonin suhteelliseen kosteuteen liittyvät vaatimukset ja lattiapäällystevalikoiman rajaaminen perustuvat tiiviillä lattiapäällysteillä päällystetyissä betonilatioissa esiintyneisiin VOC-ongelmiin. Niitä on esiintynyt välipohjarakenteissa erityisesti paksujen betonivalujen kuten kuorilaattojen ja teräskotelopalkkien juotosvalujen kohdalla. Ongelmat ovat hyvin ilmeisesti aiheutuneet päällystettävyydsmittauksissa tehdyistä virheistä, mutta osaksi myös kosteudenmittausohjeissa (mittaussyvyyden määrittelyssä ja mittausrvirheen huomioonottamisessa) olleista puutteista. Useat tilaajat ovat jopa kokonaan kieltäneet muovimattojen käytön. Lisäksi on vaadittu, että betonirakenteiden suhteellisen kosteuden on oltava alle 80 % RH koko rakenteen paksuudella ennen lattiapäällysteen asennusta, mikä poikkeaa huomattavasti yleisestä ohjeistuksesta ja pidentää huomattavasti rakenteen kuivumisaikaa. Myös vaadittu mittausrkohtien lukumäärä on ollut huomattavasti suurempi (esimerkiksi yksi mittausrkohta 100 m^2 :ä kohti) kuin RT-kortissa [12] esitetään. Sen mukaan 1–2 kohtaa/kerros saattaa riittää, jos rakenne ja tuleva päällyste ovat samat kerroksen kaikissa tiloissa. Joissakin uudisrakennuskohteissa on ollut ”varmuuden maksimoimiseksi” vaatimuksena, että rakennuksen liittymät on suunniteltava kaasutiiviiksi. Kaasutiiviuden vaatimustasoa eikä sen

todentamiseen käytettävää mittaumenetelmää (merkkiainekoetta) ole kuitenkaan tarkemmin esitetty. Vaatimuksen taustalla lienee tilaajien sisäilmaongelmaisissa rakennuksissa käyttämä korjausmenetelmä, jossa mikrobivaurioituneita materiaaleja jätetään rakenteisiin. Tätä menetelmää käytettäessä pyritään rakennusosien liittymät korjaamaan täysin tiiviiksi, jotta epäpuhtauksia ei kulkeudu vauriokohdasta sisäilmaan. Suunniteltaessa uutta rakennusta nykyisiä suunnitteluohjeita noudattaen rakenteisiin ei pitäisi muodostua mikrobikasvustoja, joten vaatimusta uudisrakennuksen kaasutiivyydestä voidaan pitää ylimitoitettuna.

3.3 Käytännön kokemuksia suunnittelunohjauksesta

Rakennuksen vaippaan liittyvät detaljit ja leikkaukset valmistuvat usein vasta aivan suunnittelun loppuvaiheessa, eikä suunnitelmien yhteensovitukselle ole varattu riittävästi aikaa. Tietomallinnettavassa kohteessa keskitytään tyypillisesti runkorakenteiden ja taloteknisten järjestelmien suunnitteluun sekä niiden keskinäiseen yhteensovittamiseen. Rakennuksen vaipan yksityiskohtia ei kyetä kuitenkaan vielä mallintamaan riittävällä tarkkuudella, joten ne on piirrettävä ns. perinteisiä piirustusohjelmistoja käyttäen. Tämän vuoksi sisäilman laadun näkökulmasta tärkeä detaljisuunnittelu jää helposti lähes viimeiseksi suunnittelutehtäväksi.

Suunnittelijoiden osaamisessa on puutteita rakenteiden kuivumisajan sekä rakennusosien ja -materiaalien kastumisen estämiseksi tarvittavien suojausten osalta. Esimerkiksi paksujen alapohja- ja välipohjarakenteiden päällä käytetään tiiviitä lattiapäällysteitä eikä oteta huomioon niiden yhteisvaikutusta rakenteiden kuivumisaikaan. Tällöin saatetaan suunnitella rakenteita, jotka eivät ehdi kuivua hankkeeseen varatun rakentamisaajan puitteissa. Suunnitteluvaiheessa tämä aika on yleensä tiedossa. Kuivumis- ja rakentamisaika voidaan tarvittaessa selvittää laskennallisesti, kun rakenneratkaisut ovat selvillä. Lisäksi suunnitelmissa mainitaan harvoin riittävän yksityiskohtaisesti, miten kosteudelle arat rakennusmateriaalit ja -osat on suojattava kuljetuksen, asennuksen ja työmaatoteutuksen aikana.

Myös työmaa-aikaisten laadunvarmistustoimenpiteiden määrittely jää suunnitelma-asiakirjoissa usein vaillinaiseksi, koska se ei kuulu selkeästi hankkeen minkään osapuolen tehtäviin. Suunnittelijat esittävät laadunvarmistustoimenpiteitä sekä suunnitelmissa että työselostuksissa, mutta niiden suorittamista ja vaatimustasoa ei ole määritelty kovinkaan yksityiskohtaisesti. Kokonaiskuvan hahmottamiseksi on suositeltavaa koota kaikki vaadittavat laadunvarmistustoimenpiteet yhteen asiakirjaan (laadunvarmistussuunnitelmaan). Siinä viitataan, missä selostuksissa ja selvityksissä on annettu tarkemmat ohjeet laadunvarmistuksen toteutustavoista sekä niiden tulosten hyväksymisestä ja dokumentoinnista [13].

4. Työmaan kosteudenhallinnan ohjaus

Työmaan kosteudenhallintasuunnitelma on aluksi yleensä varsin yleispiirteinen, koska se pohjautuu liiaksi urakoitsijan yleispätevään mallisuunnitelmaan, eikä suunnitelmaa ole laadittu ennen rakennustyön aloitusta. Suunnitelmaa joudutaan usein päivittämään vastaamaan kyseisen hankkeen erityispiirteitä ja vaatimuksia, vaikka nämä on esitetty tarkasti asianmukaisesti laaditussa kosteudenhallintaselvityksessä tai kosteudenhallintasuunnitelmaohjauksessa.

Työmaan kuivumisolosuhteet oletetaan laskelmissa liian hyväksi (tyypillisesti ilman lämpötila +20 °C ja suhteellinen kosteus 50 % RH). Todellisuudessa työmaalla eivät vallitse tällaiset optimaaliset olosuhteet rakenteiden vaatiman usean kuukauden pituisen kuivumisajan aikana. Tämän vuoksi on tärkeää seurata työmaan olosuhteita reaaliaikaisesti tallentavia mittalaitteita käyttäen ja ottaa huomioon poikkeavien olosuhteiden vaikutus kuivumisaikaan.

Sääsuojien käyttö on lisääntynyt ilahduttavasti viime vuosina. Myös rakenteiden kosteudenmittausten osalta tilanne on parantunut huomattavasti, ja mittaukset tehdään nykyisin lähes poikkeuksetta nykyohjeiden mukaisesti. Sen sijaan suhtautumisessa työmaa-aikaisten vesivahinkojen vakavuuteen on usein vielä toivomisen varaa.

5. Yhteenveto

Kosteudenhallintaa koskeva säädökset ja suunnitteluohjeet ovat huomattavasti uudistuneet aivan viime vuosina. Olemassa olevia ohjeita pitää kuitenkin osata soveltaa ja tarkentaa hankekohtaisesti sekä tunnistaa tilaajien ja rakennusvalvontojen vaatimuksissa ja toimintatavoissa olevat erot. Tämä tuo haasteita hankkeen eri osapuolten tehtäviin, koska suuresta ohjemäärästä huolimatta edelleen pitää kyetä ennakoimaan, miten kussakin hankkeessa halutaan toimittavan.

Tilaajien on ymmärrettävä kosteudenhallinnan tärkeys hankkeen onnistumisen kannalta ja tuettava valitsemaansa kosteudenhallintakoordinaattoria tehtävän hoitamisessa. Koordinaattorin on oman osaamisensa ja kokemuksensa kautta kyettävä tuomaan hankkeeseen lisäarvoa ja oltava mukana heti suunnittelun alusta lähtien. Hänen on tuettava suunnittelijoita kosteusteknisesti turvallisten rakenneratkaisujen aikaansaamiseksi ja niihin liittyvien laadunvarmistustoimenpiteiden määrittelemiseksi. Tällä tavoin voidaan ennakolta ratkaista hankalimmatkin kysymykset ja luoda hankkeeseen keskusteleva ja kehityshakuinen ilmapiiri pelkän asioiden toteamisen sijaan. Kosteudenhallintakoordinaattorin suunnitteluosaaminen on suureksi avuksi tehtävän hoitamisessa työmaatekniikan tuntemuksen merkitystä unohtamatta.

Lähdeluettelo

- [1] Suomen rakentamismääräyskokoelma C2. Veden- ja kosteudeneristys. Määräykset ja ohjeet 1998 (kumottu).
- [2] Ympäristöministeriön asetus (782/2017) rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta.
- [3] Kuivaketju10: Tilaaminen-ohjekortti. 2018. Saatavilla: http://kuivaketju10.fi/wp/wp-content/uploads/2018/03/Kuivaketju10-Tilaaminen_150313.pdf.
- [4] RT 07-10805 Terveen talon toteutuksen kriteerit. Kriteerit ja ohjeet toimitilarakentamiselle. 2003. Rakennustietosäätiö.
- [5] Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. 2020.
- [6] RT 103087 Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK18. 2019. Rakennustietosäätiö.
- [7] TOPTEN-ohjekortti 117c01 Kosteudenhallintaselvitys, Merkitys ja sisältö. Rakennusvalvonta. Yhtenäiset käytännöt. 2018. Saatavilla: <https://www.toptenrava.fi/doc/tulkintakortit/MRL-117c01A.pdf>.
- [8] Oulun kaupunki/rakennusvalvonta. Kuivaketju10:n ja kosteudenhallintaselvityksen vaiheet lupaa hakiessa ja rakentaessa. Saatavilla: <https://www.ouka.fi/oulu/rakennusvalvonta/kuivaketju10>, viitattu 23.8.2021.
- [9] RIL107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [10] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. 2020. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [11] Ympäristöministeriön asetus (1047/2017) rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista.
- [12] RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittausta. 2021. Rakennustietosäätiö.
- [13] Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Vornanen-Winqvist, C., Annala, P.(2019). Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriö.

Paksun betonipalkin kuivattaminen ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä

Pasi Lehtimäki¹, Esa Tommola¹ ja Pauli Sekki²

¹ SafeDrying Oy

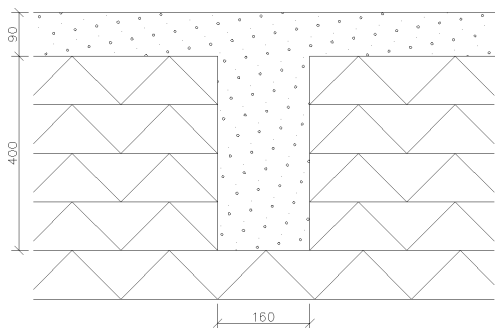
² Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Rakennesuunnittelussa joudutaan välillä tilanteisiin, jossa paikoitellen valettava betonikerros kasvaa suureksi kantavien palkkien yms. vuoksi. Nämä kohdat asettavat myöhemmälle kuivumiselle usein haasteita, koska alhaalta nouseva kosteus pidentää betonin kuivumisaikoja merkittävästi. Näitä ongelmia on jouduttu korjaamaan kiinteistön käytön aikana. Tässä tutkimuksessa selvitettiin ilmakiertoisen kuivatuskanaviston kykyä nopeuttaa paksun palkkirakenteen kuivumista. Tehdyssä tutkimuksessa tarkasteltiin koekappaletta, johon oli sijoitettu ilmakiertoiset kuivatuskanavistot, jossa ilmaa lämmitettiin ja kuivattiin. Kuivumista mitattiin jatkuvatoimisilla tietojä keräävillä kosteus- ja lämpötila-antureilla. Tuloksista voitiin havaita, että kuivuminen oli voimakkainta kuivatuskanavistojen ympärillä, riippumatta niiden asennussyvyydestä. Laskennallisesti verrattiin suhteellista kostetta palkin yläosassa ilman alemmaa kuivatuskanavaa. Tarkastelun perusteella palkkileveydellä 160 mm voidaan riittävä kuivatusvaikutus saavuttaa yhdellä lähelle rakenteen yläpintaa sijoitettavalla kanavalla.

1. Johdanto

Tutkimuksessa haluttiin selvittää, miten kuvan 1 mukaisen maanvastaisen palkki-laattarakenteen kuivumista voitaisiin nopeuttaa, erityisesti paksujen palkkiosuoksien osuudella. Palkki on maanvastaisilta sivuiltaan eristetty EPS- lämpöeristeellä. Palkin alapinnan kautta rakenne kuivuu heikosti tai voi jopa hieman kastua maasta päin tulevan kosteusrasituksen vuoksi. Yläpinnan kautta palkin kohta ei pääse kuivumaan tehokkaasti pintamateriaalin asennuksen jälkeen, koska pintamateriaalina on useimmiten huonosti kosteutta läpäisevällä lattiapäällyste. Tästä johtuen palkin kohta vaatii pidemmän kuivatusajan kuin laatta ja rakentamisessa haasteeksi tulee palkkien vaatima kuivumisaika. Palkin kohdalta rakenteen pitää olla riittävän kuiva riittävän syvältä, jotta pinnoittamisen jälkeen kosteus ei nouse kosteammasta palkin sisäosasta pintalaattaan ja nosta pintamateriaalin alapuolista kosteutta haitalliselle tasolle.



Kuva 1. Leikkauskuva tutkittavasta palkki-laattarakenteesta.

Tässä tutkimuksessa selvitetään ilmakiertoisen kuivatuskanaviston kykyä nopeuttaa paksun palkkirakenteen kuivumista. Tutkimus sisältää kokeellisen osuuden, jossa seurattiin palkkia sekä laattaa kuvastavien koekappaleiden kuivumista. Kokeessa palkkiin oli sijoitettu ilmakiertoiset kuivatuskanavistot palkin ylä- ja alaosaan. Kanavistot oli liitetty koneelliseen ilmakiertoon, jossa ilmaa lämmitettiin ja kuivattiin. Kuivumista mitattiin jatkuvatoimisilla tietojäkeräävillä kosteus- ja lämpötila-antureilla. Lisäksi tutkittiin laskennallisesti, voidaanko riittävä kuivuminen saavuttaa palkin yläosassa, vaikka alapuolinen kanava jätettäisiin pois. Kokeellisen osuuden toteutti SafeDrying Oy toimitiloissaan.

2. Koejärjestely

Palkki-laattarakenteen kuivumisen nopeuttamiseksi tutkittiin menetelmää, jossa palkkiosuuden sisälle asennetaan ilmakanavat, jotka on rei'itetty ja päällystetty huokoisella kankaalla. Ilmaputkiin johdetaan kuivattua ja lämmitettyä ilmaa. Lämmitetyn ilman avulla saadaan lämmitettyä koko rakennetta mikä nopeuttaa kuivumista. Rei'itetty ilmakanava tuottaa niin sanotun kolmannen kuivumissuunnan rakenteen sisälle päin ilmakanavan suuntaan, jolloin reunapintojen kautta tapahtuvan kosteuden siirtymisen vaikutus vähenee, ja sijoittamalla putki kriittiselle alueelle, halutun rakenneosan kuivuminen tehostuu merkittävästi. Lisäksi lämmitettäessä rakennetta ja käytettäessä koneellisesti kuivattua ilmaa, muodostuu kuivatettavan rakenteen ja ilmakanavan välille suuri vesihöyryn osapaine-ero, jolloin kosteus siirtyy rakenteessa tehokkaasti ilmakanavan suuntaan.

Koejärjestely palkkirakenteessa oli kuvan 2 mukainen. Palkkia kuvastavan koekappaleen mitat olivat: leveys 160 mm, korkeus 490 mm ja palkin pituus 300 mm. Valuun asennettiin pituussuunnassa kulkeväksi kaksi halkaisijaltaan 50 mm kuivatuskanavaa. Toisen yläpinnan ollessa 90 mm syvyydessä ja toisen 340 mm syvyydessä pinnasta lukien. Kuivatuskanavat sijoitettiin leveyssuunnassa keskelle palkkirakennetta. Lattialaattaa kuvastavan koekappaleen leveys oli 160 mm, paksuus 90 mm ja syvyys 300 mm.

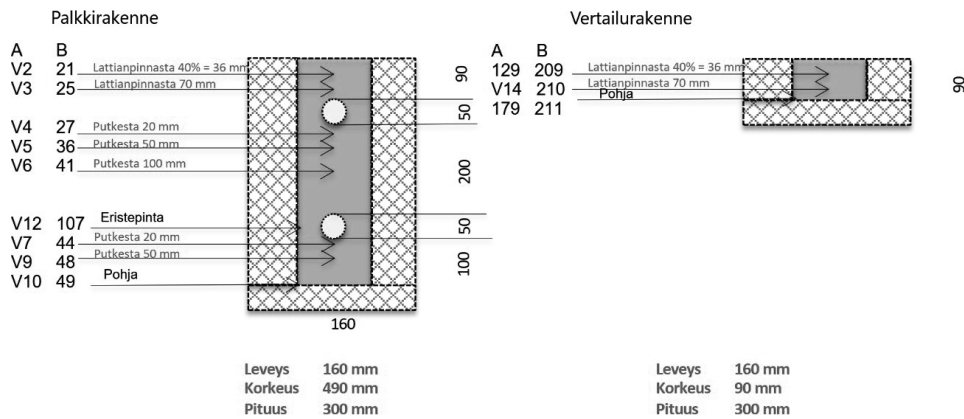
Molemmat valut tehtiin 50 mm XPS- eristeeseen, jonka osat liimattiin uretaaniliimalla yhteen. XPS-eriste on heikosti kosteutta läpäisevää, jolloin voidaan olettaa, että kosteus siirtyy pääasiassa ylöspäin huonetilaan avoimen betonipinnan kautta. Palkkivalussa kuivuminen tapahtui myös rei'itetyn ilmakanavan kautta. Valuun käytetty betoni oli S100 säkkitavaraa (sideainemääräarvio 180kg/1t), jonka sekoitusresepti oli 70 kg S100-kuivabetonia ja 8,3 litraa vettä. Tällöin vesisideainesuhde on arviolta luokkaa 0,65.



Kuva 2. Koejärjestely, palkkirakenne (vasemmalla) ja vertailukappale

Koekappaleisiin sijoitettiin 10 kpl Vaisalan HMP110- antureita ja 14 kpl IOLiving STR- antureita sveitsiläisellä HYT-mittapäällä. Molemmat anturityypit mittasivat jatkuvatoimisesti sekä lämpötilaa, että suhteellista kosteutta. Valuun asennettuihin mittausputkiin tehtiin viilto sivulle ja putken ulkopinta suojattiin suodatinkankaalla. Putken päät teipattiin. Mittausputkeen mittalaitteen taustalle asennettiin solumuovieriste.

Mittausanturien sijoittelu toteutettiin molempiin päihin identtisinä. Näin saatiin samoista mittausvyvyksistä kahdennetut mittausarvot, jolloin voidaan arvioida paremmin mahdollista mittausvirhettä. Kuvassa 3 on esitetty mittauspisteiden sijoittelu ja niitä vastaavat antureiden tunnukset. V-kirjaimella numeroidut anturit olivat Vaisalan, ja pelkällä numerolla merkityt STR-antureita.



Kuva 3. Mittausantureiden sijoittelu ja poikkileikkaus

Kuivatusilman kiertoa varten toteutettiin laitteisto, jossa on adsorptiokuivain, puhallin ja kanavalämmitin. Ilmavirta säädettiin siten, että kuivattavassa halkaisijaltaan 50 mm ilmakanavassa virtausnopeus oli noin 5 m/s ja lämpötila noin 47 °C.

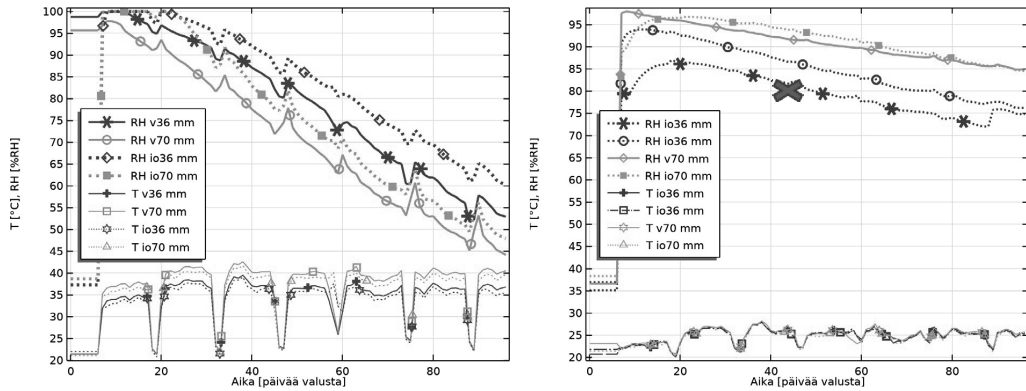
Lämmitetty kuivatusilma lämmitti palkkivalurakennetta. Lattiavalurakennetta ei lämmitetty. Sisäilman lämpötila vaihteli 20-27 °C välillä ja suhteellinen kosteus 43-77 %.

Palkin koneellinen kuivatus oli päällä jatkuvasti. Noin kahden viikon välein lämmitys otettiin pois päältä, jotta saatiin luettua lämpötilan ja kosteuden vertailuarvot huoneenlämpötilan olosuhteissa.

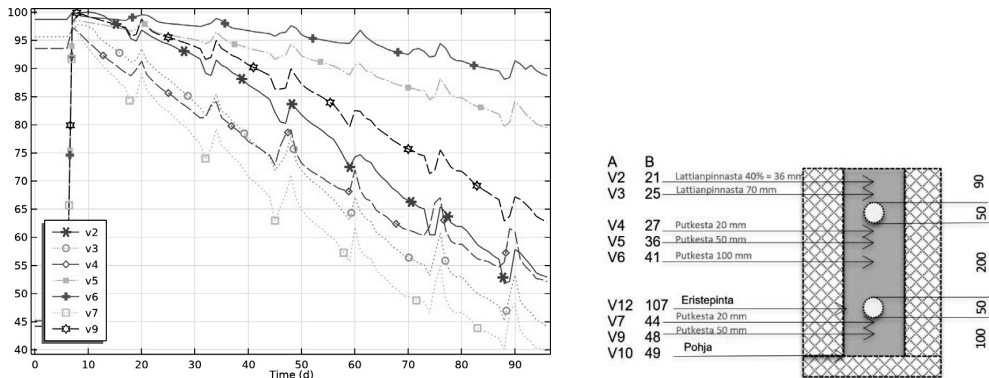
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaukset

Koekappaleiden lämpö- ja kosteusmittausten päätulos on esitetty kuvassa 4. Palkin mittausten perusteella suhteellinen kosteus on testijakson lopussa yläpinnasta syvyydellä 36 mm ~ 55-60 %RH ja syvyydellä 70 mm ~ 45-50 %RH. Vertailukappaleen suhteelliset kosteudet vastaavilla syvyyksillä ovat syvyydellä 36 mm ~ 75 %RH ja syvyydellä 70 mm ~ 85 %RH.



Kuva 4. Vasemmalla palkin ja oikealla laatan kuivuminen 36 mm ja 70 mm syvyydellä, mikä palkin tapauksessa on 20 mm kuivatusputken yläpuolella ja laatassa 20 pohjasta. Tulosten perusteella voidaan hylätä toinen io36 mm mittauksista (129).



Kuva 5. Mittaustulokset palkkikoekappaleesta kaikista Vaisalan sensoreilla mitatuista mittapististä.

Palkkirakennekoekappaleessa kuivuminen on ollut voimakkainta lähellä kuivatuskanavaa (20 mm etäisyydellä) mittapistissä V3, V4 ja V7 sekä rakenteen pintaosassa V2. Kolmenkuukauden kuivatusjakson aikana näissä pisteissä betonin kosteus on laskenut noin tasolle 40-55 %RH. Hitainta kuivuminen on ollut kuivatuskanavien välillä olevassa mittauspisteissä V6, jossa kosteus on laskenut noin 90 %RH tasolle. 50 mm etäisyydellä putkesta olevien mittauspisteiden V5 ja V9 kosteudet eroavat toisistaan kohtalaisen paljon. Kosteudet ovat näissä noin 65 %RH ja 80 %RH.

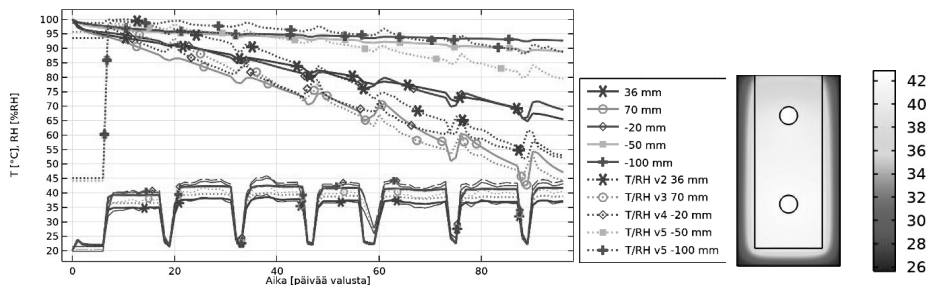
3.2 Laskennallinen tarkastelu

Laskennallisessa tarkastelussa tutkittiin koetilannetta (palkki sekä laatta) sekä arvioitiin laskennallisesti alemman tuuletusputken vaikutusta palkin yläosan suhteelliseen kosteuteen. Kuvissa 6-8 on havainnollistettu mallinnettuja tapauksia. Laskennassa testattiin betonin hygroskooppisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuuden huomioivaa mallia, joka vastaa pääosin tutkimuksessa [3] käytettyä mallia, mutta massataseyhtälöön on lisätty lämpötilariippuva kosteuskapasiteettitermi. Tätä varten betonin kosteudensitomiskyky on määritetty lämpötilariippuvana hyödyntäen olemassa olevaa tutkimustietoa [4], jonka mukaan betonin kosteudensitomiskyky korkeassa lämpötilassa laskee. Näin ollen lämmitettäessä materiaalikosteutta vapautuu huokosilmaan, mikä näkyy korkeampana mitattuna suhteellisenä

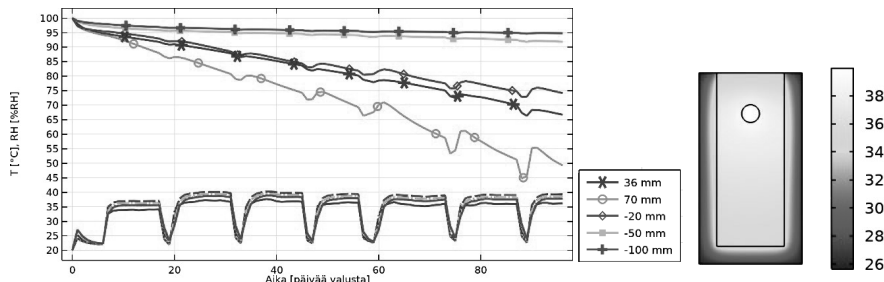
kosteutena. Vastaavasti lämpötilan laskiessa huokosilmasta sitoutuu kosteutta materiaaliin, jolloin huokosilmasta mitataan matalampaa kosteutta. Mallilla pyritään siis kuvaamaan betonin huokosilmasta mitattavaa suhteellista kosteutta huomioiden lämpötilan vaikutus. Laskentamallilla kuvaamaan myöhemmissä julkaisuissa. Periaatteita materiaalin lämpötilariippuvan kosteudensitomiskyvyn huomioimiseen laskennassa on esitetty julkaisussa [5].

Tarkastelu tehtiin kaksiulotteisena. Eristemateriaalin ominaisuuksina käytettiin kirjallisuudesta saatuja arvoja. Betonin materiaalmalli vastaa v/s 0,65 betonin ominaisuuksia [6] lukuun ottamatta sorptio-ominaisuuksia, joihin on lisätty lämpötilariippuvuuden huomioiva termi. Koekappaleiden ympäröivän ilman lämpötila määritettiin vertailukoekappaleen mittausten perusteella ja suhteellinen kosteus arvioitiin menoilman mittausten perusteella. Ilmakanavan lämpö- ja kosteusvirta on mallinnettu Comsol-ohjelmiston putkivirtausmallilla, jossa ilman lämpötila ja kosteus on arvioitu mitatun meno- ja tuloilman keskiarvojen perusteella.

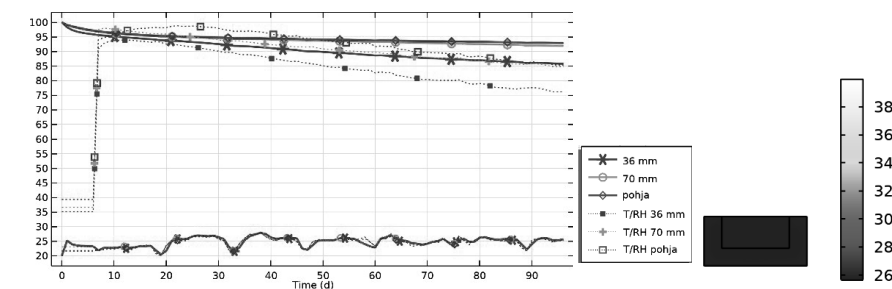
Laskennan päätulokset on esitetty kuvissa 6-8. Vertailuun valittiin palkin yläosan mittauspisteet v2-v5. Kuvissa selite 36 mm ja 70 mm on syvyys rakenteen pinnasta ja -20 mm, -50 mm ja -100 mm on etäisyys ylempään kanavan alapinnasta.



Kuva 6. Laskentatulokset verrattuna kokeen mittaustuloksiin (mitattu=katkoviiva).



Kuva 7. Vertailulaskelman tulokset ilman alempaa tuuletusputkea.



Kuva 8. Vertailulaskelma laatan kuivumiskokeeseen (mitattu=katkoviiva).

3.3 Tulosten tarkastelu

Mittaustulokset ovat pääosin loogisia, vaikka yksittäisten mittauspisteiden tulokset jouduttiin hylkäämään mittalaitteen aiheuttaman virheen takia. Joissain kohdissa koekappaletta eristemuotin valun tiiveys on vaikuttanut tuloksiin, mikä havaitaan poikkeavan nopeana kuivumisena. Laskenta ei huomioi kyseisiä epäideaalisuuksia, ja laskentatulosten perusteella suhteellinen kosteus laskeekin tarkastelujaksolla hitaammin pois lukien mittauspisteen, joka on 20 mm ylemmän tuuletuskanavan yläpuolella (V3), jossa kuivuminen on mittauksiin verrattuna hyvin samalla tasolla. Betonin lämpöriippuvan kosteudensitomiskyvyn huomioivan laskentamallin voidaan todeta kuvaavan melko hyvin lämpötilan aiheuttamaa muutosta suhteellisessa kosteudessa verrattuna mittauksiin.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että kuivatuskanavistolla saavutetaan nopeampi kuivuminen palkkirakenteen yläosassa kuin laatassa vastaavilla syvyyksillä. Lisäksi vertailulaskelman perusteella nähdään, että alemman kuivatuskanavan poistamisella ei ole merkittävää vaikutusta palkin yläosan kosteuteen (suhteellinen kosteus nousee vain noin 2-3 %-yksikköä), vaikka kuivatuskanavan alapuolen kosteus nouseekin 5-10 %-yksikköä.

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti, miten rakentamisessa kuivumisaikojen kannalta haasteellisia paksuja alapohjalaatastoon liittyviä palkkirakenteita voitaisiin kuivattaa nopeammin. Tutkittiin kuivumisen nopeuttamiseksi rakenteen sisälle asennettavan ilmakiertoisen kuivatuskanaviston vaikutusta. Ilmaputkiin johdetaan kuivattua ja lämmitettyä ilmaa, jolloin koko rakennetta saadaan lämmitettyä ja kuivumista nopeutettua. Tärkeimpänä kuivatusreittinä on rei'itetyn ilmanakanavan tuottama niin sanottu kolmas kuivumissuunta rakenteen sisälle päin ilmanakanavan suuntaan.

Tämän kuivatuskanaviston tehoa tutkittiin koejärjestelyllä, jossa palkkimaisen koekappaleen sisälle sijoitettiin kaksi kuivatuskanavaa. Kuivumista mitattiin useasta eri syvyydestä rakenteessa. Kuivuminen oli tehokkainta kuivatuskanaviston ympärillä. Laskennallisen tarkastelun perusteella voitiin todeta, että tarkastellulla palkkileveydellä voidaan riittävä kuivatusvaikutus saavuttaa yhdellä lähelle rakenteen yläpintaa sijoitettavalla kanavalla.

Lähdeluettelo

- [1] Nevander, L. E. ja Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok. 2.painos. Stockholm, ABSvensk Byggtjänst och författarna. 538 s.
- [2] SFS-EN 13829 2000. 2000. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [3] Sekki P, Karvinen T, Vinha J. Moisture behavior of external insulated precast concrete wall panels. *Journal of Building Physics*. 2021;44(5):409-434. doi:10.1177/1744259120925850
- [4] S. Poyet, Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete, *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 1052–1059.
- [5] T. Colinart T, Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 2: Influence on hygrothermal behavior of hemp concrete, *Energy and Buildings* 152 (2017) 42–51.
- [6] *by2020 Betonin kuivumisaika-arvio* ohjelmakehitykseen liittyvä tutkimusprojekti, jonka tuloksia ei ole julkaistu.

A5. Sisäilman olosuhteet ja laatu

Koneellisen yöilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun päiväkotijä koulurakennuksissa

Sami Lestinen¹, Simo Kilpeläinen¹, Risto Kosonen¹, Maria Valkonen² ja Juha Jokisalo¹

¹ Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu, konetekniikan laitos

² Terveyden ja hyvinvoinnin laitos

Tiivistelmä

Julkisella sektorilla työskentelee noin 30 % työvoimasta ja julkisten rakennusten käyttäjiin kuuluu vajaa miljoona lasta ja opiskelijaa. Yöilmanvaihdolla varmistetaan hyvä sisäilman laatu ennen käyttöjakson alkua. Yleinen käytötapa on pysäyttää ilmanvaihto tilojen käyttöjakson jälkeen ja käynnistää se uudelleen noin 2 tuntia ennen tilojen käyttöä. Nykyisin ilmanvaihtoa pidetään jatkuvasti käynnissä vähintään minimi-ilmanvaihdolla, jolla taataan hyvä sisäilman laatu kaikissa tilanteissa. Tällöin ilmanvaihdon energiankulutus voi kasvaa merkittävästi pysäytetyn yöilmanvaihdon strategiaan verrattuna. Aalto-yliopiston ja THL:n tutkimuksessa mitattiin yöilmanvaihdon vaikutusta sisäilman laatuun ja lämpöoloihin 11 julkisessa rakennuksessa, joissa ei ollut aiemmin raportoituja sisäilmaongelmia. Tutkimuksessa verrattiin pysäytettyä, jatkuvaa ja jaksottaista yöilmanvaihtostrategiaa. Päiväilmanvaihtoa käytettiin normaalisti. Tuloksissa TVOC-pitoisuudet olivat aamuisin samalla tasolla kaikilla yöilmanvaihdon käyttötavoilla, ja tilojen käytöllä oli suurin vaikutus TVOC-pitoisuuteen päivällä. Yöilmanvaihtostrategialla ei ollut systemaattista vaikutusta sisäilman mikrobipitoisuuksiin. Mittausten perusteella ilmanvaihdon käynnistys 2 tuntia ennen tilojen käyttöä riittää, eikä jatkuvalla ilmanvaihdolla saada parempaa sisäilman laatua käyttöjakson alkuhetkellä.

1. Johdanto

Suomessa julkinen sektori vastaa noin 30 % kokonaistyöllisyydestä. Lisäksi julkisten rakennusten käyttäjiin kuuluu vajaa miljoona lasta ja opiskelijaa. Tutkimuksissa sisäilman ja ilmanvaihdon on todistettu vaikuttavan ihmisen oppimiseen, suorituskykyyn ja terveyteen [1]-[3]. Sen vuoksi hyvä sisäilmasto ja ilmanvaihdon käyttö on tärkeä osa työntekijöiden ja tilojen käyttäjien hyvinvoinnin edistämistä. Koneellisella yöilmanvaihdolla pyritään siihen, että sisätiloissa on hyvä ilman laatu jo ennen käyttöjakson alkua. Yleinen käytötapa on ollut käynnistää ilmanvaihto noin 2 tuntia ennen tilojen käyttöä ja pysäyttää se käyttöajan jälkeen. Toinen vaihtoehto on käyttää ilmanvaihtoa jatkuvasti minimi-ilmanvaihdolla. Kolmas vaihtoehto on huuhdella tiloja ajoittain käyttöaikojen ulkopuolella. Nykyisin ilmanvaihtokoneita saatetaan pitää jatkuvasti käynnissä. Tällä varmistetaan hyvä sisäilman laatu kaikissa käyttötilanteissa. Tällöin energiankulutus voi kuitenkin kasvaa merkittävästi pysäytetyn yöilmanvaihdon strategiaan verrattuna. Tarpeenmukaisessa järjestelmässä ilmamäärä muuttuu henkilömäärän mukaan, mikä pienentää koneiden energiankulutusta tilojen käyttöaikana verrattuna vakioilmavirtajärjestelmään.

Yöilmanvaihdon vaikutusta sisäilman laatuun on tutkittu vähän. Suomessa aiheesta on tehty tutkimuksia [4], [5]. Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että yöaikainen TVOC-pitoisuuden kasvu voi johtua tilojen epäpuhtauslähteistä, jos ilmanvaihto ei ole käynnissä tai jos tilaa ei tuuleteta [6], [7]. Tilankäyttäjät altistuvat sisäympäristön mikrobeille ja erilaisille muille epäpuhtauksille kuten TVOC, ja siksi oleellista on arvioida myös niiden pitoisuuksia [8]. TVOC-pitoisuus on approksimaatio, joka kuvaa materiaaliemissioita. Aalto-yliopisto selvitti yhteistyössä THL:n kanssa vuosien 2019 - 2021 aikana toteutetussa Työsuojelurahaston hankkeessa, miten

julkisten rakennusten yöilmanvaihtoa käytetään järkevästi siten, että ylläpidetään hyvät sisäilmasto-olosuhteet ja vältetään turhaa energiankulutusta [9]. Kenttämittauksissa mitattiin 11 julkista rakennusta, joissa ei ollut aiemmin raportoituja sisäilmaongelmia.

2. Menetelmät

Kenttämittauksissa ilmanvaihtoa käytettiin samoilla asetuksilla kahden viikon jaksoissa. Vertailutapauksina olivat 1) pysäytetty yöilmanvaihto, 2) jatkuva yöilmanvaihto ja 3) jaksottainen yöilmanvaihto. Normaalisti jatkuvalla ilmanvaihdon käytöllä olevissa kohteissa ei ilmanvaihtokoneita saanut pysäyttää yöksi. Päivällä tilojen käytön aikana ilmanvaihtoa käytettiin normaalisti. Pysäytetyn yöilmanvaihdon tapauksissa ilmanvaihto käynnistyi 2-3 h ennen tilojen käyttöä ja jaksottaisen yöilmanvaihdon tapauksissa ilmanvaihto oli vuorotellen käynnissä ja pysäytettynä 2 tunnin jaksoissa arkena ja 3 tunnin jaksoissa viikonloppuna. Taulukko 1 esittää mitattujen päiväkotien tiedot ja taulukko 2 vastaavasti koulurakennusten tiedot. Päiväkoti 3 oli käytössä 24 h/vrk, joten ilmanvaihdon muutoksia ei voitu tehdä, ja kohteessa tarkasteltiin mittaussuureiden vaihtelua eri testijaksojen välillä.

Taulukko 1. Mitatut päiväkotien leikkihuoneet: Mainittu hlö määrä on tavanomainen ihmismäärä huoneessa, lattia on huoneen lattiapinta-ala, CAVmax on maksimi-ilmavirta vakioilmavirtaisessa järjestelmässä, ja VAVmax on maksimi-ilmavirta muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä.

Päiväkoti 1: touko-heinä	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2012 CAVmax: 3 L/s, m ² lattia: 21 m ² , hlö: 5-10	pysäytetty	05-18	-
	jatkuva	00-24	00-24
	jaksottainen	05-18 + 20-22 + 01-03	02-05 + 10-13 + 18-21
Päiväkoti 2: kesä-heinä	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 2014, 36m ² , 5-10 hlö VAVmax: 2.8 L/s, m ²	jatkuva min	00-24, yöllä min	00-24, min
	jatkuva max	00-24, yöllä max	00-24, max
Päiväkoti 3: marras-joulu	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 2013, 34m ² , 10-20 hlö ylläpito: 1.5 L/s, m ²	jatkuva (käytössä 24 h/vrk)	00-24	00-24
Päiväkoti 4: tammi-helmi	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2015 CAVmax: 3 L/s, m ² lattia: 37 m ² , hlö: 10-20	pysäytetty	03:00-17:00	04:00-17:00
	jatkuva	00-24	00-24
	jaksottainen	04-20 + 22-01	00-04 + 08-12 + 16-20
Päiväkoti 5: elo-syyskuu	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2003 CAVmax: 3.5 L/s, m ² lattia: 30 m ² hlö: 5-15	pysäytetty	ma 04:30-21:00, ti-pe 05:30-21:00	1h per päivä
	jatkuva	00-24	00-24
	jaksottainen	kuten pysäytetty+01-03	02-05+10-13+18-21

Taulukko 2. Mitattujen koulujen luokkatilat ja yliopistossa ryhmätyötila.

Koulu 1: huhti-toukokuu	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rak: 1953, rem: 2012 CAVmax: 3 L/s,m ² Lattia: 60 m ² Hlö: 20-30	pysäytetty	ma-ti 05:30-20:00 ke-pe 05:30-18:00	06:00-18:00
	jatkuva max	00-24	00-24
	jatkuva min	kuten pys.+ yö ½-teho	kuten pys.+ yö ½-teho
Koulu 2: elo-syyskuu	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rakennettu: 2012 VAVmax: 3.5 L/s,m ² Lattia: 87.5 m ² , hlö: 20-30	jatkuva	00-24	00-24
	jaksottainen	05-18 + 20-22 + 01-03, muu aika minimillä	02-05 + 10-13 + 18-21, muu aika minimillä
Koulu 3: syys-marras	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rak: 2006, rem: 2012 CAVmax.: 3 L/s,m ² Lattia: 65 m ²	pysäytetty	ma 05-18, ti-pe 06-18	14-15
	jatkuva	00-24	00-24

Hlö: 20-30	jaksottainen	kuten pys.+20-22+01-03	02-05+10-13+18-21
Koulu 4: tammi-maalis	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rakennettu: 2013	pysäytetty	ma 04-18, ti-pe 05-18	1h per päivä
VAVmax.: 3 L/s,m ²	jatkuva	00-24	00-24
Lattia: 40 m ² , hlö: 10-20	jaksottainen	kuten pys. +20-22+00-02	02-05+10-13+18-21
Yli-aste: elo-lokakuu	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rak: 1975, rem: 2014,	pysäytetty	ma 05-17, ti-pe 06-17	-
VAVmax: 3.6 L/s,m ²	jatkuva max	00-24, yöllä max	00-24, max
Lattia: 42 m ² , hlö: 20-25	jatkuva min	00-24, yöllä min	00-24, min
Yliopisto: huhti-touko	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
Rak: 1964, rem: 2015	pysäytetty	06-17	-
VAVmax: 4 L/s,m ²	jatkuva	00-24	00-24
Lattia: 39.5 m ² , hlö: 3-5	jaksottainen	06-17 + 19-21 + 02-04	02-05 + 10-13 + 18-21

TVOC-pitoisuuden mittarin tarkkuus on luokkaa $\pm 15\%$. Mittarissa on metalli-oksidi-puolijohde (MOS) -anturi, jonka anturointiyksiköt tunnistavat eri VOC-yhdisteitä ja kokoavat niistä normalisoidun TVOC-signaalin. Paine-eroa ulkoseinän yli ja ilmanvaihdon päätelaitteissa mitattiin Sensirion-mittarilla, jonka tarkkuus on $\pm 0.08 \text{ Pa} \pm 3 \%$ mittausravosta. Huoneilman lämpötilaa ja kosteutta mitattiin Tinytag plus 2 mitarilla, jonka tarkkuus on $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ja $\pm 3 \%$ RH. Hiilidioksidia mitattiin Tinytag CO₂ mittarilla, jonka tarkkuus on $\pm 50 \text{ ppm} \pm 3 \%$.

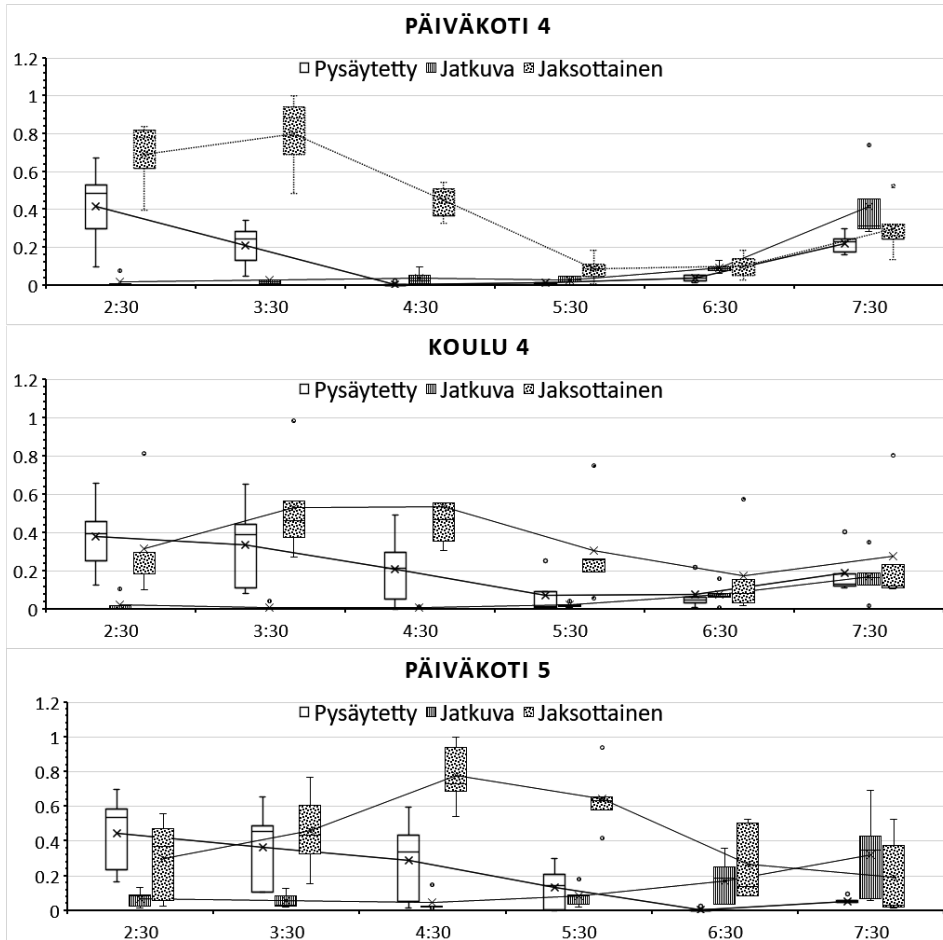
Laskeutuvan pölyn näytteet kerättiin 8 vierekkäisellä petrimaljalla sisäilmasta ja ulkoilmasta. Näytemaljat olivat sisätilassa kaapin päällä noin 2.0-2.5 metrin korkeudessa ja ulkona suojaisessa paikassa. Näytteistä eristettiin DNA Chemagic DNA plant -kitillä käyttäen apuna KingFisher eristysrobotia. Näytteistä määritettiin kvantitatiivisella polymeraasiketjureaktiolla (qPCR-menetelmä) sienten kokonaispitoisuus (Unifung), *Penicillium*, *Aspergillus* ja *Paecilomyces variotii* -ryhmä (Pen/Asp) sekä grampositiiviset (Grampos) ja gramnegatiiviset (Gramneg) bakteerit. Ulkoilmasta ei raportoitu Grampositiivisia bakteereja menetelmään liittyvän epävarmuuden vuoksi. Lisätietoa mittauskohteista ja käytetyistä menetelmistä on hankkeen loppuraportissa [9].

3. Tulokset

3.1 TVOC

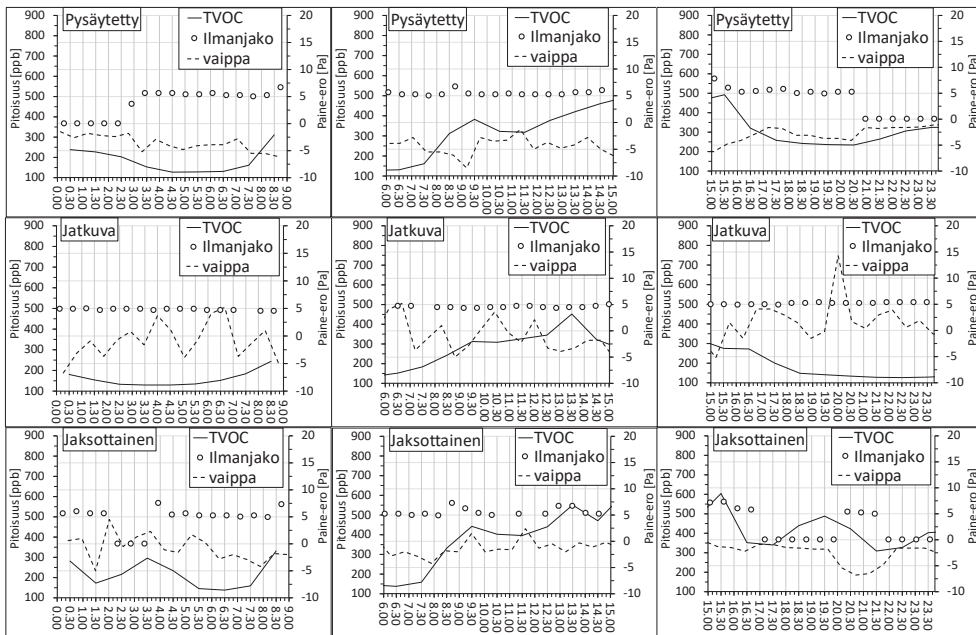
Kuvassa 1 on esitetty dimensioton TVOC-pitoisuus arkena aamuyöllä, jossa kuvaajan vertailutapaukset sisältävä tulosjoukko vaihtelee välillä [0...1]. Tulosten perusteella yöilmanvaihtostrategian valinnalla ei ollut merkitystä arkaamun TVOC-pitoisuuteen, jos ilmanvaihto oli käynnistetty nykysuosituksen mukaisesti 2 tuntia ennen tilojen käyttöä.

Päiväkodissa 4 TVOC-pitoisuus oli aamulla klo 6-8 alhaisimmillaan ilmanvaihdon käynnistyttyä ennen tilojen käyttöä (pysäytetty). Tällöin myös TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli pienintä. TVOC-pitoisuus alkoi kuitenkin kasvamaan, kun tilojen käyttö alkoi. Aamulla klo 6-8 suurin keskimääräinen TVOC-pitoisuus ja pitoisuuden vaihtelu oli ilmanvaihdon jatkuvalla käytöllä. Koulussa 4 TVOC-pitoisuus oli alhaisin, kun ilmanvaihtoa pidettiin jatkuvasti käynnissä. Tällöin myös TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli pienintä. Aamulla klo 6-8 suurin keskimääräinen TVOC-pitoisuus ja pitoisuuden vaihtelu oli ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä. Päiväkodissa 5 TVOC-pitoisuus oli alhaisimmillaan aamulla klo 6-8, kun ilmanvaihto oli käynnistetty 2 tuntia ennen tilojen käyttöä (pysäytetty). Tällöin TVOC-pitoisuus kasvoi suurimmaksi ilmanvaihdon jatkuvalla ja jaksottaisella käytötavalla ja TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli suurinta ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä. Yöllä TVOC-pitoisuudet kasvoivat suurimmaksi ilmanvaihdon jaksottaisella käytötavalla.



Kuva 1. Dimensioton TVOC-pitoisuus arkena aamuyöllä ennen tilojen käyttöä. Kellonajan kohdalla oleva kuvaajien järjestys on vasemmalta oikealle: pysäytetty, jatkuva ja jaksottainen yöilmanvaihto. Viivakuvaaja yhdistää keskiarvoja.

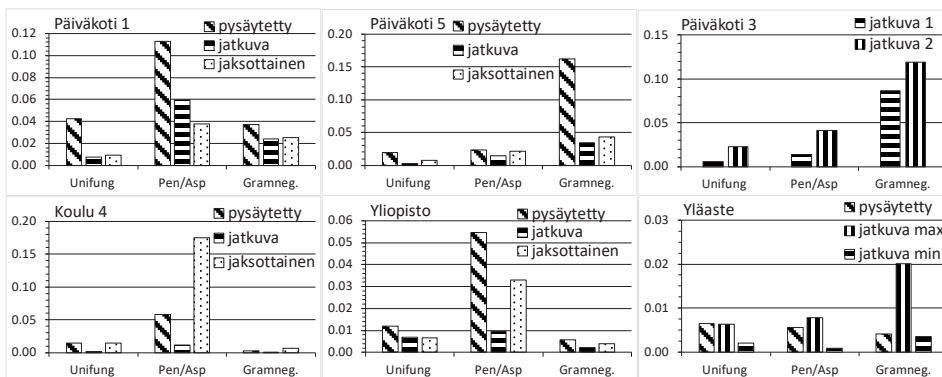
Kuvassa 2 on esitetty koneellisen ilmanvaihdon ja TVOC-pitoisuuden vaihtelua tyypillisessä tilanteessa (Koulu 4, maanantai). Rivillä 1 on pysäytetty yöilmanvaihto (ylin rivi), rivillä 2 on ilmanvaihdon jatkuva käyttö ja rivillä 3 on jaksottainen käyttö. Sarake 1 (vasen) on aamulla klo 00-09, sarake 2 on päivällä klo 06-15 ja sarake 3 on illalla klo 15-24. Ilmanjaon paine-ero on tuloilman suutinkanavan ja huonetilan välinen paine-ero. Tuloksista nähdään, että ilmanvaihdon käynnistyksen jälkeen TVOC-pitoisuus pienenee minimitasolleen noin 2 tunnissa, ja kasvaa vastaavasti, kun ilmanvaihto pysäytetään. Tuloksissa suurin vaikutus sisäilman TVOC-pitoisuuteen oli päiväaikaisella tilojen käytöllä, koska TVOC-pitoisuuden paikalliset ääriarvokohtat seurasivat hiilidioksidipitoisuuden vastaavia ääriarvokohtia [9].



Kuva 2. TVOC-pitoisuus, ilmanjaon paine-ero sekä paine-ero ulkoseinän yli (vaippa). Kuvaajissa vasen pysty akseli on TVOC-pitoisuus [ppb], vaak akseli on kellonaika ja oikea pysty akseli on paine-ero [Pa].

3.2 Mikrobit

Kuvassa 3 on eri mikrobityyppien sisäilma/ulkoilma-suhde, joka oli yleensä vain muutaman prosentin luokkaa. Mittauksissa ei havaittu systemaattista vaikutusta eri yöilmanvaihtostrategioilla mikrobipitoisuuteen. Yläasteen sisävyöhykkeen luokassa oli keskimäärin pienimmät sisä/ulko-suhteet. Suhde kasvoi yli 10 %:n muutamassa kohteessa. Tähän voi vaikuttaa useat tekijät, kuten sisätilojen käyttö, ilmanvaihdon suodattimien kunto, sisustusmateriaalit tai ikkunatuuletus. Ulkoilman mikrobitasot vaihtelevat vuodenaikojen mukaan siten, että talvella pitoisuus on pienempi lumipeitteen takia. Terveessä rakennuksessa sienien lähteenä on normaalisti ulkoilma, kun taas bakteerien lähteenä ovat ihmiset. Päiväkodissa 3 oli samat ilmanvaihdon käyttötavat molemmilla testijaksolla.



Kuva 3. Mikrobitien sisäilma/ulkoilma-suhde. Unifung on sienien kokonaispitoisuus, Pen/Asp on sieniryhmä ja Gramneg on gramnegatiiviset bakteerit.

4. Yhteenveto

Tuloksissa ilmanvaihdon käyttötavoilla ei ollut vaikutusta keskimääräiseen TVOC-pitoisuuteen tilojen käyttöjakson alussa. TVOC-pitoisuudet olivat suurempia päivällä kuin yöllä. Tämä viittaa siihen, että tilojen käytöllä oli suurin vaikutus tilojen TVOC-pitoisuuksiin. Laskeutuvan pölyn näytteissä sisäilman mikrobipitoisuus oli yleensä vain muutaman prosentin luokkaa ulkoilmasta mitattua pitoisuudesta. Yöilmanvaihdon käyttöstrategialla ei näyttänyt olevan systemaattista vaikutusta sisäilman mikrobipitoisuuksiin, vaan pitoisuudet vaihtelivat tapauskohtaisesti. Yleisesti ottaen hankkeessa mitattujen fysikaalisten suureiden luonnollinen vaihtelu oli testijaksoilla suurempaa kuin yöilmanvaihdon käyttötavan merkitys. Tulosten perusteella ilmanvaihdon käynnistys 2 tuntia ennen tilojen käyttöä näyttäisi olevan riittävä toimenpide, eikä jatkuvalla ilmanvaihdolla tällöin saada parempaa sisäilman laatua käyttöjakson alkuhetkellä.

5. Kiitokset

Tutkimusta ovat rahoittaneet Työsuojelurahasto, Aalto-yliopistokiinteistöt Oy ja Senaattikiinteistöt sekä Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungit.

Lähdeluettelo

- [1] Wargocki, P., Sundell J., Bischof W., Brundrett G., Fanger P. O., Gyntelberg F., Hanssen S. O., Harrison P., Pickering A., Seppänen O. and Wouters, P. 2002. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: Report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air* 12 (2):113–128.
- [2] Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., ... & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor air*, 21(3), 191-204.
- [3] Carrer, P., de Oliveira Fernandes, E., Santos, H., Hänninen, O., Kephelopoulos, S. and Wargocki, P. 2018. On the development of health-based ventilation guidelines: principles and framework. *International journal of environmental research and public health*, 15(7), 1360.
- [4] Fingerroos, M., Kolari, S., Pasanen, P. ja Kesikuru, T. 2005. Ilmanvaihdon jatkuvan toiminnan hyödyt. Espoo SIY Raportti 23, SIY Sisäilmätieto Oy, s. 101 – 107.
- [5] Asikainen, V., Pasanen, P. ja Kokotti, H. 2015. Yleisilmanvaihdon jaksottaisen käytön vaikutukset rakennusten paine-eroihin ja sisäilman laatuun. Espoo: SIY Raportti 33, SIY Sisäilmätieto Oy, 247 – 252.
- [6] Montgomery, J. F., Storey, S. and Bartlett, K. 2015. Comparison of the indoor air quality in an office operating with natural or mechanical ventilation using short-term intensive pollutant monitoring. *Indoor and Built Environment*, 24(6), 777-787.
- [7] Chao, C. Y. H. and Hu, J. S. 2004. Development of a dual-mode demand control ventilation strategy for indoor air quality control and energy saving. *Building and Environment*, 39(4), 385-397.
- [8] Leppänen, H. K., Täubel, M., Jayaprakash, B., Vepsäläinen, A., Pasanen, P. ja Hyvärinen, A. (2018). Quantitative assessment of microbes from samples of indoor air and dust. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 28(3), 231-241.
- [9] Lestinen, S., Kilpeläinen, S. ja Kosonen, R. 2021. Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun - Työsuojelurahaston hanke 180094. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA, 3/2021, Aalto-yliopisto, Konetekniikan laitos. ISBN: 978-952-64-0414-1 (electronic).

Lämpöolosuhteiden hallinta sähkölämmitetyillä lasella

Kari Nöjd ja Eero Kokkonen
Sweco Rakennetekniikka Oy

Tiivistelmä

Tässä työssä tarkasteltiin sähkölämmitettyjen lasien vaikutusta lämpöviihtyisyyteen ja rakennuksen E-lukuun yhden esimerkkitalan osalta. Lisäksi tarkasteltiin hiilijalanjäljen muodostumista kolmella eri lämmitysratkaisulla. Työn tarkastelut perustuivat dynaamiseen energia- ja olosuhdesimointiin (IDA ICE) ja virtauslaskentaan (OpenFOAM). Rakennuksen ulkovaipan U-arvot ja talotekniikka oletettiin olevan normaalin energiatehokkaan uudisrakentamisen tasoa. Tuloksina osoittautui, että sähkölämmitteisillä lasella oli mahdollista saavuttaa korkeatasoiset lämpöolosuhteet tilaan tekemättä kompromisseja arkkitehtuurin kanssa. E-luku määräykset saatiin täytettyä, kun ratkaisua hyödynnettiin paikallisesti. Hiilijalanjäljen osalta on mahdollista saavuttaa alhaisempi käytön aikainen päästövaikutus kaukolämmitykseen verrattuna.

1. Johdanto

Ulkoilmaa vasten olevat suuret lasipinnat jäähtyvät kylmällä ilmalla sisäilmaa alhaisempaan lämpötilaan, jolloin ilman lämpötila ikkunapintojen läheisyydessä laskee ja alkaa liikkua alaspäin. Tämä ympäristöään viileämpi ilma usein leviää lattiatasolla tilan sisäosiin, ja voi aiheuttaa vedontunnetta luoden epäviihtyisät olosuhteet tilassa oleskeleville ihmisille kaukana ikkunapinnoista. Ympäristöön kylmemmät ikkunapinnat myös alentavat operatiivista lämpötilaa. Tyypillinen lämmitysratkaisu tällaisissa tiloissa on konvektori tai puhallin, joka on asennettu lattian rajaan lasin välittömään läheisyyteen, tai ritilän taakse lattiapinnan alapuolelle. Näiden lämmitysratkaisujen ongelmana on, että ne vievät tilaa ja niiden takia joudutaan tekemään kompromisseja tilan arkkitehtuuria suunniteltaessa. Lisäksi tällaisten ratkaisujen virtaustekninen toimivuus voi poiketa suunnitellusta merkittävästi.

Lattialämmitys on myös yleisesti käytetty lämmitystapa. Se on huomaamaton, mutta usein riittämätön poistamaan vedontunteen aiheuttaman virtausilmiön suurten viileiden pintojen tapauksessa. Kuvassa 1 on havainnollistettu erilaisia lämmitysratkaisuja ja niiden vaikutusta tilan arkkitehtuuriin.

Tässä työssä tarkasteltiin voiko sähkölämmitetyillä lasella ja lattialämmityksen yhdistelmällä toteuttaa lämpöviihtyisyyden osalta korkeatasoisen tilan tekemättä kompromisseja tilan arkkitehtuurin näkökulmasta. Tarkastelut tehtiin käyttäen energiatehokkaan uudisrakennuksen U-arvoja.

Lämmitysmuoto vaikuttaa myös laajemmin rakennuksen suunnitteluun ja esimerkiksi rakennusluvan saantiin E-luvun kautta [1]. Lämpöviihtyisyyden lisäksi tutkittiin sähkölämmitettyjen lasien vaikutusta E-lukuun ja hiilijalanjäljen muodostumiseen. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin sähkölämmitettyjen lasien käyttöä eräässä rajatussa tapauksessa uudisrakentamisen yhteydessä.



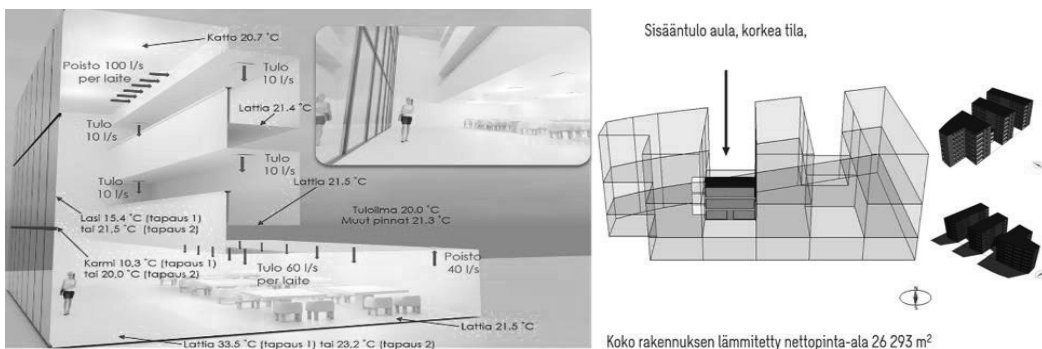
Kuva 1. Havainnekuva tilasta erilaisilla lämmitysratkaisuilla.

Muita soveltuvia käyttötarkoituksia sähkölämmitetyille lasille ovat vaikeasti huollettavat tilat, jotka vaativat lämmitystä, korjausrakentamisessa eteen tulevat erilaiset tila- ja lämmitysratkaisut, kondenssin hallinta lasin sisä- tai ulkopinnassa, esimerkiksi uimahalleissa ja kylpylöissä sekä lämpimissä ja kosteissa ulkoilman olosuhteissa. Sähkölämmitettäviä lasia voidaan käyttää myös jään- ja lumensulatuksessa.

2. Menetelmät

Työn tarkastelut perustuivat energialaskenta- ja virtauslaskenta (CFD) -työkaluilla suoritettuihin analyysihin. Energialaskennassa käytetty IDA ICE -ohjelmisto on moniväyhyke-tyyppinen työkalu, joka mallintaa tiloja kuvaamalla kunkin tilan yhdellä pisteellä (keskiarvo) virtausteknisten suureiden osalta. OpenFOAM on puolestaan avoimen lähdekoodin virtauslaskenta -ohjelmisto, jonka avulla ratkaistaan virtausta kuvaavat Navier–Stokes -yhtälöt numeerisesti kolmiulotteisessa laskenta-alueessa. Yhdistämällä yllä mainittujen työkalujen tuottama informaatio, on mahdollista analysoida kustannustehokkaasti ja tarkasti isojenkin tilojen olosuhteita.

Tarkasteltu kohde oli 15 m leveä, 12 m syvä ja 10 m korkea tila, sisältäen ulkoilmaa vasten olevan lasijulkisivun. Ilmanvaihto ja lämmitystehot mitoitettiin IDA ICE -ohjelman avulla. Näin saatuja pintalämpötiloja käytettiin reunaehtoina CFD-laskennassa, jotta virtauslaskennan reunaehdot olisivat mahdollisimman realistiset.



Kuva 2. Tarkasteltu kohde. Vasemmalla osa tilasta, jossa lämpöviihtyisyyttä tarkasteltiin, ja oikealla koko rakennuksen malli, jota käytettiin E-luvun laskennassa.

Lämpöviihtyisyyden lisäksi tutkittiin sähkölämmitettyjen lasien vaikutusta koko rakennuksen E-lukuun. Kuvassa 2 on esitetty tarkastellun tilan geometria, tulo- ja poistoilmalaitteiden sijainnit sekä E-luvun laskennassa käytetyn koko rakennuksen geometria. Tilat kuvaavat Helsingissä sijaitsevan Swecon toimistorakennuksen todellisia tiloja. Työn tavoite ei ollut tarkastella ko. rakennuksen todellista toimintaa, joten joitakin yksityiskohtia muutettiin kustannustehokkuuden kasvattamiseksi.

2.1 Lämpöviihtyisyys

Tilan lämpötilajakauma ja käyttäjän kokemaa lämpöviihtyisyyttä evaluoitiin suorittamalla virtauslaskenta ajasta riippumattomassa RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) -formuloinnissa käyttäen k -SST turbulenssimallia. Tarkasteluissa käytetty laskentaverkko koostui noin 74 miljoonasta laskentakopista.

Käyttäjän kokemaa lämpöviihtyisyyttä arvioitiin vetoriskin DR avulla. Vektoriski voidaan evaluoida ilman lämpötilan, virtausnopeuden ja turbulenssin intensiteetin funktiona EN ISO 7730-standardin [2] mukaisesti. Tässä analyysissä vektoriski evaluoitiin perustuen CFD-simulointien tuloksiin ja yhtälöön

$$DR = (34 - T)(|u| - 0,05)^{0,62} \left(37 \sqrt{\left(\frac{2k}{3} \right)} + 3,14 \right), \quad (1)$$

missä T = lämpötila
 u = virtausnopeus
 k = turbulenssin kineettinen energia

Yhtälön (1) tuloksena saatu prosenttiluku kuvaa kuinka suuri osa ihmisistä kokee vedon tunnetta.

CFD-simulointiin valittu tilanne kuvasi talvipäivää ulkoilman ollessa -26 °C. Laskenta suoritettiin kahdelle eri tapaukselle, joista ensimmäisessä tapauksessa (tapaus 1) tilan lämmitystehontarve katettiin lattialämmityksellä (pintalämpötila $33,5$ °C). Toisessa tapauksessa (tapaus 2) lasijulkisivu varustettiin sähkölämmityksellä lasien sisäpinnan lämpötila ohjattiin huoneilman keskimääräiseen lämpötilaan ($21,5$ °C). Loppuosa lämmitystehontarpeesta katettiin lattialämmityksellä (pintalämpötila $23,2$ °C).

Ilmanvaihdon päätelaitteiden tyyppi, lukumäärä, ilmamäärät sekä sijainnit kuvattiin tilan toimintojen mukaisesti, joita on havainnollistettu kuvassa 2. Lasijulkisivun lasien sisäpintojen lämpötilat laskettiin U -arvolla $0,8$ W/(m² K) ja karmien sisäpintojen lämpötilat vastaavasti U -arvolla $2,0$ W/(m² K). Tapauksien 1 ja 2 osalta reunaehtot pintalämpötiloille on myös esitetty kuvassa 2. Lopuksi tehtiin vielä herkkyydentarkastelu, jossa lasin sisäpinta lämmitettiin lämpötilaan 20 °C.

2.2 E-luku

E-luvun osalta laskettiin kaksi tapausa. Ulkovaipan U -arvot ja talotekniikka kokonaisuutena oletettiin olevan normaalin energiatehokkaan uudisrakentamisen tasoa. Ensimmäisessä tapauksessa tarkasteltiin koko toimistorakennusta, jonka päälämmitysmuoto oli kaukolämpö. Tätä verrattiin toiseen tapaukseen, jossa korkealla lasijulkisivulla varustettu tila lämmitettiin kaukolämmön sijaan suoralla sähkölämmityksellä. Tuloilman lämmitys lämmitettiin kuitenkin kaukolämmöllä molemmissa tapauksissa. E-luvun laskennat suoritettiin IDA ICE -ohjelmistolla.

2.3 Hiilijalanjälki

Tilan lämmitysenergian vuotuinen tarve laskettiin IDA ICE -ohjelmistolla. Energiamuotojen päästökertoimina käytettiin taulukon 1 arvoja. Hiilijalanjäljet laskettiin 50 vuoden aikajaksolta (2020–2069).

Taulukko 1. Energiamuotojen päästökertoimet (g CO₂/kWh) [3].

Energiamuoto	2020	2030	2040	2050	2060
Sähkö	121	57	30	18	14
Kaukolämpö	130	93	63	37	33

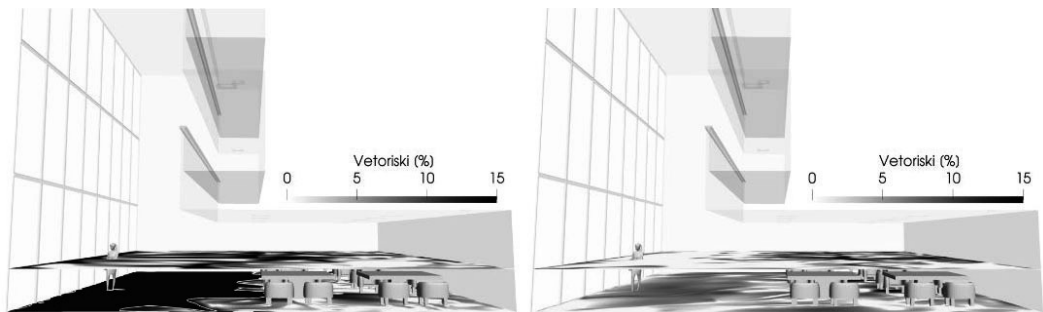
Hiilijalanjäljen osalta vertailtiin tilan lämmittämisestä aiheutuvia CO₂e päästövaikutuksia seuraavilla lämmitys- ja ohjaustavoilla:

1. Tila lämmitetään täysin kaukolämmöllä. Lämmöntuotannon hyötysuhde 97% ja jakelun 90%.
2. Tila lämmitetään täysin suoralla sähkölämmityksellä. Sähkölämmitettyjen lasien hyötysuhde 95% sisätilaan.
3. Tila lämmitetään vesikiertoisella lattialämmityksellä, lämmönlähteenä maalämpö. Tilan käyttöaikana (arkisin klo 07:00-18:00, ei viikonloppukäyttöä), lämmityskaudella, sähkölämmityksellä lasilla pidetään ikkunan sisälämpötila huoneen keskilämpötilan tasossa.

3. Tulokset

3.1 Lämpöviihtyisyys

Virtauslaskennan päätuloksena saatu vetoriski on esitetty kuvassa 3 molemmille tapauksille. Sisäilmastoluokituksen (2018) mukainen luokan S2 vetoriskin raja-arvo on DR=15 %. Tuloksista nähdään selvästi sähkölämmitettyjen lasien vaikutus oleskelualueen vetoriskiin: sähkölämmitettyjen lasien tapauksessa raja-arvo ei ylittynyt, kun taas tapaus 1 osalta ylityksiä esiintyi merkittävästi – etenkin 0,1 m tasolla (noin 50% lattiapinta-alasta). Herkkyystarkastelussa (sähkölämmitetyn lasin lämpötila 20 °C) oleskelualueella esiintyi raja-arvon ylityksiä, joskin vähäisemmässä määrin.



Kuva 3. Virtauslaskennan päätuloksena saatu vetoriski kahdessa poikkileikkaustasossa (0,1 m ja 1,1 m korkeuksilla) molemmille eri tapaukselle (vasemmalla tapaus 1 ja oikealla tapaus 2). Sisäilmastoluokituksen mukainen luokan S2 vetoriskin raja-arvo on DR=15 %, joka on vasemman puolimmaisena kuvan alemmassa poikkileikkaustasossa havainnollistettu valkoisella viivalla.

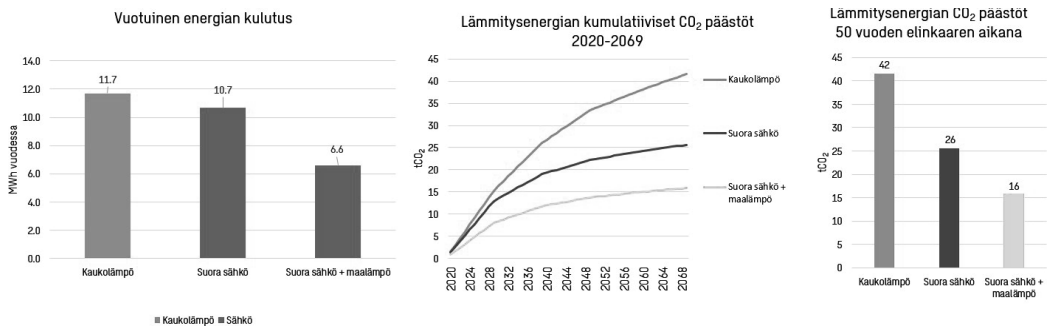
Kattavammin tuloksia on havainnollistettu videolla, joka on katsottavissa seuraavan linkin kautta https://youtu.be/owW1_jFi3cY.

3.2 E-luku

Uuden toimistorakennuksen E-luku ei saa ylittää raja-arvoa 100 kWhE/(m² a) [1]. Tapauksessa, jossa koko rakennuksen lämmönlähteenä on kaukolämpö, E-luvuksi laskettiin 87,7 kWhE/(m² a). Kun korkean lasijulkisivun sisältämän tilan lämmitys muutettiin kaukolämmöstä suoraksi sähkölämmitykseksi, E-luvuksi saatiin 88,1 kWhE/(m² a). Molemmissa tapauksissa rakentamismääräysten vaatimukset saatiin täytettyä E-luvun vaatimusten osalta. Ero E-luvuissa oli suhteellisen pieni, ja selittyi sillä, että tarkasteltu tila oli kooltaan suhteessa koko rakennuksen kokoon pieni.

3.3 Hiilijalanjälki

50 vuoden elinkaaren ajalta tarkasteltuna suurimman hiilijalanjäljen, 42 tCO₂, aiheutti tapaus, jossa tarkasteltava tila lämmitetään kaukolämmöllä. Lämmitettäessä tila suoralla sähkölämmityksellä päästiin selvästi alhaisempaan hiilijalanjälkeen, 26 tCO₂. Tämä johtuu pääasiassa kaukolämmön tuotannon suuremmista ennustetuista päästövaikutuksista, mutta myös kaukolämmityksen alhaisemmista lämmöntuoton ja jakelun hyötysuhteista. Selkeästi alhaisimman hiilijalanjäljen aiheutti tapaus, jossa suora sähkölämmitys oli yhdistettynä maalämpöpumpuilla lämmitettävään vesikiertoiseen lattialämmitykseen. Tällöin hiilijalanjälki jäi 16 tCO₂. Kuvassa 4 on esitetty vuotuiset energian kulutukset, hiilijalanjäljen kumulatiivinen muodostuminen 50 vuoden elinkaaren ajalta sekä lämmitysenergian kokonaispäästövaikutukset (tCO₂).



Kuva 4. Vasemmalla vuotuiset energiankulutukset, keskellä kumulatiivinen hiilijalanjälki ja oikealla lämmitysenergian tuotannosta aiheutuva hiilijalanjälki 50 vuoden ajalta.

4. Yhteenveto

Työssä osoittautui, että kylminä talvipäivinä lattialämmitys ei yksin riitä tuottamaan korkeatasoista lämpöviihtyisyyttä oleskeluvyöhykkeelle tarkastellun esimerkkikohteen kaltaisissa tiloissa normaalin uudisrakentamistason ulkovaipan U-arvoilla.

Lisäksi työssä osoitettiin, että sähkölämmityksellä lasilla on mahdollista saavuttaa korkeatasoinen lämpöviihtyisyys ympäri vuoden ilman erillisiä konvektoreja tai puhaltimia – siis ilman kompromisseja arkkitehtuurin osalta tilaa suunniteltaessa.

E-luku vaatimukset eivät suosi suoran sähkölämmityksen käyttöä [4]. Tässä artikkelissa esitetty E-lukutarkastelu kuitenkin osoittaa, että sähkölämmitettyjä laseja voidaan käyttää tukemaan rakennuksen päälämmitysjärjestelmää tiloissa, joissa isot lasipinta-alat asettavat erityisiä haasteita lämpöviihtyisyyden toteutumiselle, olettaen että tällaiset tilat eivät vastaa pääosaa rakennuksen tiloista. E-luku pitääkin aina tarkastella tapauskohtaisesti.

Käytetyillä energiamuotojen päästökertoimilla, suora sähkölämmitys aiheuttaa pienemmät vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt verrattuna kaukolämmöllä toteutettuun lämmitykseen. Pienimmät kasvihuonekaasupäästöt aiheutuivat kuitenkin yhdistämällä vesikiertoinen lattialämmitys (lämmönlähteenä maalämpö) ja ohjaamalla sähkölämmitettyjä laseja tarpeen mukaisesti tilan käyttöön perustuen.

Sähkölämmitettyjä laseja on mahdollista ohjata siten, että suoraa sähkölämmitystä käytetään vain tilojen ollessa käytössä ja ulkolämpötilan näin vaatiessa. Muulloin tila voidaan lämmittää kiinteistön muulla päälämmitystavalla, esimerkiksi vesikiertoisella lattialämmityksellä, jonka lämmönlähteenä on kaukolämpö tai lämpöpumppu. Tämä ohjaustapa mahdollistaa korkeatasoiset lämpöolosuhteet tilassa käyttöaikana samalla optimoiden lämmityksen käyttökustannuksia. Sähkölämmiteillä lasilla voidaan myös estää kondenssin syntymistä lasipinnoille, mikä parantaa lasirakenteiden kosteusteknistä toimintaa vähentäen riskiä homeen muodostumiselle.

Virtauslaskennalla voidaan varmistaa jo suunnitteluvaiheessa hyvien sisäilmasto-olosuhteiden, kuten esimerkiksi lämpötilajakauman ja lämpöviihtyisyyden, toteutuminen erilaisissa tiloissa. Lisäksi virtauslaskenta mahdollistaa esimerkiksi tapauskohtaisesti sähkölämmitetyn lasin pinalämpötilan optimoinnin riittävälle tasolle tai lämmitetyn lasin osuuden määrittämisen kokonaispinta-alasta. On huomionarvoista, että tämän työn kaltaisissa analyyseissä esiintyy useita virhe- ja epätarkkuuslähteitä, joiden kontrollointi ja minimoiminen työn tavoitteen kannalta on ensiarvoisen tärkeää, jotta työn tuloksista voidaan tehdä merkityksellisiä johtopäätöksiä.

5. Kiitokset

Haluamme kiittää sähkölämmitteisiä laseja valmistavaa suomalaista, Finnglass Oy, yritystä ja erityisesti Timo Saukkoa. Finnglass mahdollisti tämän tutkimuksen toteuttamisen ja tulosten julkaisun. Yritys on kehittänyt sähkölämmitteisiä laseja yli 30 vuotta. Finnglass mahdollisti, että tutkimuksen tekijöillä oli paras mahdollinen tieto käytössä sähkölämmitteisistä lasituotteista, niiden suorituskyvystä ja sovelluskohteista.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 1010/2017. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>
- [2] ISO 7730:1994. Moderate thermal environments – determination of the pmv and ppd indices and specification of the conditions for the thermal comfort. International Organization for Standardization, Switzerland, 1994.
- [3] Kuittinen, M. (2019) Rakennuksen vähähiilisyuden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriö, Liite 4, s.46-47. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyuden_arviointimenetelma.pdf
- [4] Valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien energiamuotojenkertoimien lukuarvoista. 788/2017. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170788>

Toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat helsinkiläisissä kerrostaloissa

Juha Jokisalo^{1,2}, Sami Pajunen¹, Ilia Kravchenko¹, Simo Kilpeläinen¹, Risto Kosonen^{1,2,3}, Azin Farahani¹ ja Natalia Korhonen^{1,4}

¹ Aalto-yliopisto, Espoo, Suomi

² Smart City Center of Excellence, TalTech, Tallinna, Viro

³ College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing, Kiina

⁴ Ilmatieteen laitos, Helsinki, Suomi

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka korkeita toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat ovat helsinkiläisissä kerrostaloasunnoissa ja onko kohteiden rakentamisvuodella vaikutusta huonelämpötiloihin. Tutkimuksessa analysoitiin noin 6000-8000 kerrostaloasunnon kesäaikaiset huonelämpötilat, jotka on mitattu vuosien 2018 – 2020 aikana IoT mittareilla käyttäen yhden tunnin aikaresoluutiota. Asunnot sijaitsevat kaikkiaan 690 eri kerrostalossa, joista vanhimmat on rakennettu ennen 1950-lukua ja uusimmat 2010 luvulla. Tulokset osoittavat, että eri asuntojen väliset lämpötilaerot ovat varsin suuria, mutta kuumimpien hellejaksojen aikana merkittävä osa asunnoista ylilämpenee. Erityisen kuumen hellekesä 2018 aikana huonelämpötila ylitti 27°C yli 150 astetuntia lähes 80%:ssa tarkemmin analysoiduista noin 1100:sta asunnosta. Saman hellekesän aikana vähintään noin 3% kaikista mitatuista noin 6000 asunnosta ylitti Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 32°C. Analysoidussa aineistossa rakentamisvuoden vaikutus tutkittujen asuntojen ylilämpenemiseen 27°C ja sen ylittävien huonelämpötilojen osalta on suhteellisen pieni. Mutta vuosien 2004-2012 aikana rakennetuissa kohteissa 25°C ja 26°C huonelämpötiloja esiintyy hieman muita ikäryhmiä enemmän.

1. Johdanto

Ilmaston lämpenemisen seurauksena helleaallot ovat yleistyneet Suomessa. Suomessa rakennukset on suunniteltu ensisijaisesti kylmiin ilmasto-oloihin soveltuviksi ja pitkien ja äärimmäisten kuumien hellejaksojen aiheuttaman ylilämpenemisen torjuntaan ei ole panostettu riittävästi. Suomessa rakennusten ylilämpenemisriski helleaaltojen aikana on erityisen suuri asuinkerrostaloissa, joita ei tyypillisesti ole varustettu koneellisella jäähdytyksellä. Ylilämpeneminen aiheuttaa terveysriskejä erityisesti vanhuksille ja perussairauksista kärsiville [1]. 2000-luvun aikana Suomessa on arvioitu ilmenneen vuosittain noin 200-400 kuolemantapausta pahimpien hellejaksojen seurauksena [1, 2]. Kaupunkien keskustat ovat maaseutuymäristöä alttiimpia helteiden vaikutuksille ja esimerkiksi Helsingissä helteiden aiheuttaman kuolleisuusriskin on osoitettu olevan selvästi maaseutuymäristöä suurempi [3].

Tämä tutkimus on osa Suomen akatemian rahoittamaan HEACLIM-hanketta, jonka tavoitteena on tuottaa uutta tietoa korkeiden kesäaikaisten huonelämpötilojen vaikutuksista terveyteen Suomessa. Hanke toteutetaan vuosien 2020-2023 aikana yhteistyössä Itä-Suomen yliopiston, THL:n, Ilmatieteen laitoksen ja Aalto-yliopiston kesken. Tämän osatutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka korkeita toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat ovat helsinkiläisissä kerrostaloasunnoissa ja tutkia, onko kohteiden rakentamisvuodella vaikutusta toteutuneisiin huonelämpötiloihin.

2. Menetelmät

2.1 Huonelämpötiloihin liittyviä asetuksia

Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) [4] mukaan asuntojen tai muiden oleskelutilojen huonelämpötila ei saa ylittää lämmityskauden ulkopuolella toimenpiderajaa 32°C. Vanhuksille ja heikkokuntoisille tarkoitetuissa oleskelutiloissa sekä kotihoitoon käytettävissä asunnoissa toimenpideraja on 30°C. Lisäksi Suomen rakentamismääräykset [5, 6] ovat vuodesta 2012 lähtien vaatineet, että esim. uusien kerrostalojen simuloitu kesäaikainen (1.6-31.8) huonelämpötila ei saa ylittää 27°C:tta enempää kuin 150 astetuntia.

2.2 Analysoidut kohteet

Tutkimuksessa hyödynnettiin Aalto-yliopiston käyttöönsä saamaa erittäin laajaa helsinkiläisten asuinkekkosten kesäaikaisten huonelämpötilojen mittausaineistoa, joka on mitattu vuosien 2018-2020 aikana. Tässä tutkimuksessa kesäaikaa kuvaavalla jaksolla tarkoitetaan 15.5 ja 31.8 välistä aikaa. Kesäaikaista huonelämpötiloja on mitattu kaikkiaan 690:ssä eri kerrostalossa (Taulukko 1). Mittausaineistossa on mukana suurimmaksi osaksi ennen 2000-lukua rakennettuja kerrostaloja ja suurimman yksittäisen ikäryhmän muodostaa 90-luvulla rakennetut kerrostalot.

Taulukko 1. Mitattujen kerrostalojen lukumäärä ja osuus rakentamisvuoden mukaan luokiteltuna.

Rakentamisvuosi	-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020	Yht.
Kerrostalojen lkm.	9	76	104	118	99	177	71	36	690
Osuus, %	1	11	15	17	14	26	10	5	100

Mittausaineistossa on mukana mittausvuodesta riippuen kaikkiaan noin 6000-8000 asuinhuoneiston lämpötilat (Taulukko 2). Mitattujen huoneistojen lukumäärä on kasvanut vuodesta 2018 lähtien, koska mittauslaitteita on asennettu lisää vuosien aikana sekä uusiin että olemassa oleviin kohteisiin.

Taulukko 2. Mitattujen asuinhuoneistojen lukumäärä eri vuosina.

Vuosi	2018	2019	2020
Asuntojen lkm.	5886	7983	8197

Mittausaineistossa mukana olevista kerrostaloista on tiedossa ainoastaan rakentamisvuosi ja se, ettei kohteissa ole kiinteästi asennettuja koneellisia jäähdytyslaitteita. Koska huoneistoista ei ollut mahdollista saada muuta tietoa, tässä tutkimuksessa ei ollut mahdollista analysoida huonelämpötilaan vaikuttavien tekijöiden, kuten asunnon suuntauksen, ikkunapinta-alan, asukkaiden lukumäärän, ikkunatuuletuksen tms. vaikutuksia. Lisäksi on täysin mahdollista, että joissain mitatuissa asunnoissa on käytössä asukkaiden hankkimia liikuteltavia jäähdytyslaitteita.

2.3 Mittausjärjestelmä ja lämpötila-aineiston suodatus

Lämpötila-aineisto on mitattu IoT tyyppisillä T/RH mittareilla (Connected Airwits R2). Lämpötilan mittaustarkkuus on 0.2°C ja mittauksissa on käytetty yhden tunnin aikaresoluutiota. Jokaisessa mitatussa asuinhuoneistossa on yksi IoT mittari, joka on asennettu eteiseen. Mittarin sijainnista johtuen mitattu lämpötila kuvaa huoneiston ilman keskilämpötilaa, koska muista huoneista WC- ja keittiötilojen poistoilmaventtiileihin virtaava siirtoilma virtaa tyypillisesti eteisen kautta. Lisäksi mittarin sijainnilla on pyritty estämään suoran auringon säteilyn osuminen

mittariin. Koska mitatut lämpötilat kuvaavat huoneistojen keskilämpötilaa, mitatuissa huoneistoissa on erittäin todennäköisesti voinut esiintyä myös korkeampia lämpötiloja esim. huoneissa, joiden ikkunat suuntautuvat etelän ja lännen välille.

Ennen huonelämpötilojen analysointia mitatusta lämpötila-aineistosta suodatettiin pois sellaiset huoneistot, joiden tunnittaisista kesäaikaisista (15.5-31.8) lämpötiloista puuttui yli 10%. Puuttuva tunnittainen lämpötila-aineisto korvattiin interpoloiduilla lämpötiloilla huoneistoissa, joissa mitattuja lämpötiloja puuttui 10% tai vähemmän. Taulukossa 3 on esillä vuosittainen huoneistojen kokonaislukumäärä, joiden lämpötilat analysoitiin tutkimuksessa tarkemmin.

Taulukko 3. Asuinhuoneistojen lukumäärä eri vuosina, joiden lämpötilat analysoitiin.

Vuosi	2018	2019	2020
Asuntojen lkm.	1108	4360	3825

2.4 Sääolosuhteet

Taulukossa 4 on esillä tutkittujen kesäjaksojen (15.5-31.8) aikaiset ylimmät, alimmat ja keskilämpötilat sekä hellepäivien lukumäärät. Hellepäivällä tarkoitetaan päivää, jonka ylin lämpötila ylittää 25°C. Taulukko 4 osoittaa, että kaikki tutkimukseen valitut vuodet sopivat hyvin rakennusten kesäaikaisen yllämpenemisen tutkimiseen ja erityisen kuuma kesä 2018 erottuu hellepäivien lukumäärän suhteen muista tutkituista vuosista.

Taulukko 4. Ulkoilman lämpötilat ja hellepäivien lukumäärä kesäjaksojen (15.5-31.8) aikana.

Sääolosuhteet 15.5-31.8 välisenä aikana	Vuosi		
	2018	2019	2020
Ylin lämpötila, °C	31.2	32.8	30.6
Alin lämpötila, °C	3.5	3.4	-0.2
Keskilämpötila, °C	18.3	16.8	16.3
Hellepäivien lkm.	35	18	16

2.5 Kohteiden ryhmittely rakentamivuoden mukaan

Rakentamivuoden vaikutusta toteutuneisiin lämpötiloihin tutkittiin jakamalla kohteet neljään eri ikäryhmään I-IV. Vanhinnassa ikäryhmässä (I) on mukana ennen rakentamismääräysten aikaa rakennetut kohteet, jotka ovat valmistuneet ennen vuotta 1977. Tämän ikäryhmän rakennuksissa on käytössä joko painovoimainen tai koneellinen poistoilmanvaihto. Vuosien 1977-2003 aikana rakennetuissa kohteissa (II) on otettu huomioon mm. kulloinkin voimassa olleet lämmöneristysmääräykset, jotka ovat jakson aikana hiljalleen kiristyneet määräysten uusimisen myötä. U-arvovaatimus on esim. ulkoseinän osalta kiristynyt vuoden 1976 vaatimustasosta (0.4 W/m²,K), vuoden 1978 vaatimustasoon (0.29 W/m²,K) ja vuonna 1985 voimaan tulleeseen vaatimustasoon (0.28W/m²,K). Tämän ikäryhmän rakennuksissa on käytössä koneellinen poistoilmanvaihto. Vuosien 2004-2012 aikana rakennettujen kohteiden (III) lämmöneristystaso on edellistä ikäryhmää parempi aiempaa jaksoa tiukempien määräysten myötä. Vuonna 2003 voimaan tulleiden lämmöneristysmääräysten myötä ikkunoiden U-arvovaatimusta kiristettiin aikaisemmin voimassa olleesta 2.1W/m²,K tasosta uudelle tasolle 1.4W/m²,K. Muutos tarkoittaa sitä, että viimeistään silloin myös asuinkerrostalojen ikkunoissa siirryttiin käyttämään selektiivilaseja, jotka vähentävät auringon lämpökuormia aiemmin käytössä olleisiin lasitusratkaisuihin verrattuna. Vuonna 2003 tuli myös voimaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottomääräykset, jonka seurauksena myös asuinkerrostaloissa siirryttiin käyttämään lämmöntalteenotolla varustettua koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää. Vuonna 2013

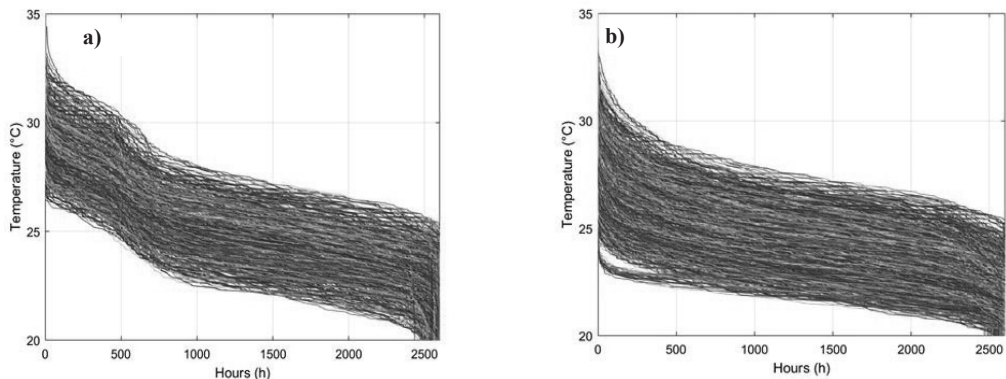
ja sen jälkeen rakennettujen kohteiden (IV), jotka kuuluvat tutkimusaineistoon, energiatehokkuusvaatimukset on täytetty E-luvun ja lämpöhäviölaskennan avulla ja kohteiden lämmöneristystaso on todennäköisesti samalla tasolla kuin vuoden 2010 jälkeen rakennetuissa ikäryhmän (III) rakennuksissa. Kaikissa tämän ikäryhmän asuinkerrostaloissa on käytössä lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen tulo- ja poisto ilmanvaihto ja kohteissa on otettu huomioon simuloituihin kesäaikaisiin huonelämpötiloihin liittyvä vaatimus (kts. luku 2.1) [5, 6].

Kohteiden ryhmittelyssä on oletettu, että kohteiden suunnittelun ja rakentamisajankohdan välillä on vain noin 2-6 kk aikaviive. Käytännössä aikaviive on kuitenkin selvästi pidempi, tyypillisesti noin vuoden tai joissain tapauksissa jopa 3 vuoden suuruusluokkaa. Tästä johtuen on erittäin todennäköistä, että osa ikäryhmien kohteista on suunniteltu aikaisempien suunnittelukäytäntöjen tai määräysten mukaisesti.

3. Tulokset

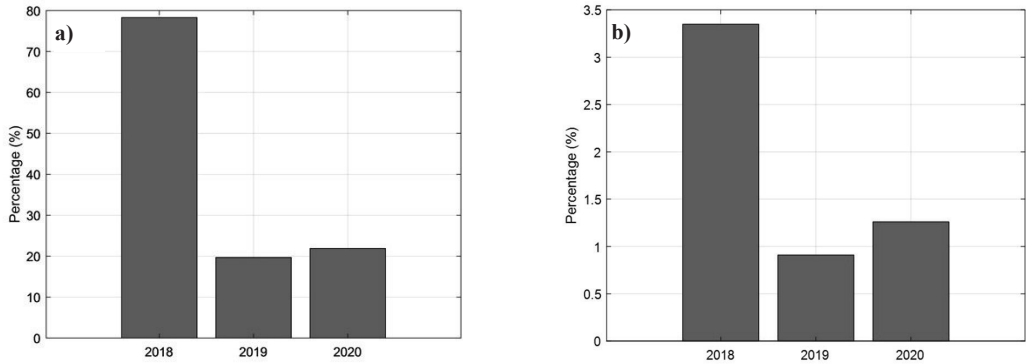
3.1 Asuntojen toteutuneet huonelämpötilat

Kuvassa 1 on esillä kaikkien lämpötila-analysointiin mukaan otettujen asuinhuoneistojen huonelämpötilojen pysyvyyskäyrät vuosien 2018 ja 2020 kesäjaksojen aikana. Kuva 1 osoittaa, että yksittäisten asuntojen väliset lämpötilaerot voivat olla varsin suuria. Erityisen kuuman hellekesän 2018 aikana (Kuva 1a) huonelämpötilat ovat selvästi korkeampia kuumimpien noin 750 tunnin ajan verrattuna 2020 kesäjaksioon (Kuva 1b). Huoneistojen ylimmät lämpötilat ovat 2018 kesäjaksion aikana noin 2-3°C korkeammat kuin 2020 kesäjaksolla.



Kuva 1. Toteutuneiden huonelämpötilojen pysyvyyskäyrät vuosien 2018 (kuva a) ja 2020 (kuva b) kesäjaksojen 15.5-31.8 aikana.

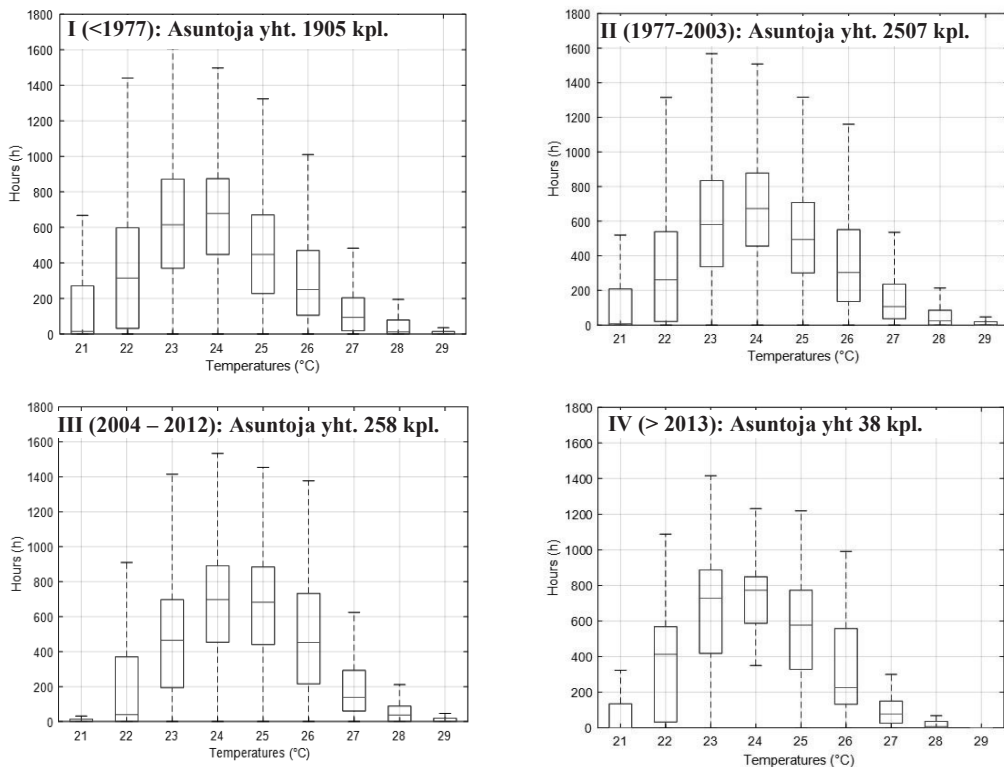
Kuvassa 2a on esillä huoneistojen osuus lämpötila-analyysihin mukaan otetuista asunnoista (kts. Taulukko 3), joiden huonelämpötila ylittää 27°C yli 150 astetuntia tutkittujen vuosien kolmen kesäkuukauden (1.6-31.8) aikana. Kuva 2a osoittaa, että e.m. kriteerin ylittäviä asuinhuoneistoja oli hellekesän 2018 aikana lähes noin 80% huoneistoista. Vaikka ylittävien huoneistojen osuus on vuosien 2019 ja 2020 aikana paljon pienempi, on e.m. kriteerin ylittäviä asuntoja jokaisen vuoden aikana suunnitteen yhtä paljon (noin 850), koska kahden jälkimmäisen vuoden aikana analysointiin noin 4 kertaa enemmän asuntoja kuin kesällä 2018 (vrt. Taulukko 3). Kuvassa 2b on esillä kesäjaksojen (15.5-31.8) aikana asumisterveysasetuksen [4] toimenpiderajan 32°C ylittävien asuntojen osuus kaikista lämpötilamittauksissa mukana olevista asunnoista (kts. Taulukko 2). Kuva osoittaa, että vähintään noin 3% kaikista mitatuista noin 6000 huoneistosta ylitti toimenpiderajan kesällä 2018.



Kuva 2. Ylilämpenevien asuntojen osuus. Kuvassa (a) 27°C yli 150 astetuntia ylittävien asuntojen osuus 1.6-31.8 välisenä aikana ja kuvassa (b) toimenpiderajan 32°C ylittävien asuntojen osuus 15.5-31.8 välisenä aikana kaikista lämpötilaseurannassa olevista asunnoista.

3.2 Rakentamisvuoden vaikutus huonelämpötiloihin

Kuvassa 3 on esillä ikäryhmien (I-IV) huonelämpötilojen tuntijakaumat vuoden 2020 kesäjaksan (15.5-31.8) aikana esitettynä laatikko-janakuvioiden avulla.



Kuva 3. Huonelämpötilojen kesäaikaiset tuntijakaumat vuoden 2020 kesäjaksan (15.5-31.8.2020) aikana luokiteltuna neljään ryhmään rakentamisvuoden mukaan. Kuvassa pystyakselit kuvaavat tuntien lukumäärää ja vaaka-akselit toteutuneita lämpötiloja jaksan aikana.

Kuva 3 osoittaa, että analysoidussa aineistossa rakentamisvuoden vaikutus asuntojen yllälämpenemiseen 27°C ja sen ylittävien huonelämpötilojen osalta on suhteellisen pieni. Mutta, vuosien 2004-2012 aikana rakennetuissa kohteissa 25 ja 26°C lämpötiloja esiintyy hieman muita ikäryhmiä enemmän. Analysoidussa aineistossa uusimman ikäryhmän (IV) osalta 27°C ja sen ylittäviä huonelämpötiloja esiintyy hieman vanhempia ikäryhmiä (I-III) vähemmän. Mutta, uusimpaan ikäryhmään kuuluu niin vähän asuntoja (38kpl), ettei niin pienien aineiston perusteella voi vielä tehdä yleistä johtopäätöstä siitä, että vuosien 2012 ja 2017 määräysten [5,6] mukaisesti suunnitellut asuinkerrostalot yllälämpenisivät vanhempia kerrostaloja vähemmän.

4. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka korkeita toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat ovat helsinkiläisissä kerrostaloasunnoissa ja onko kohteiden rakentamisvuodella vaikutusta huonelämpötiloihin. Tulokset osoittavat, että erityisen kuumen hellekesän aikana suurimmassa osassa tutkituista asuinhuoneistoista lämpöviihtyvyys vaarantuu yllälämpenemisen seurauksena ja vähintään noin 3%:ssa mitattuja asuinhuoneistoja Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32°C ylittyy. Analysoidussa aineistossa rakentamisvuoden vaikutus tutkittujen asuntojen yllälämpenemiseen 27°C ja sen ylittävien huonelämpötilojen osalta on suhteellisen pieni. Mutta vuosien 2004 -2012 aika valmistuneissa rakennuksissa 25°C ja 26°C huonelämpötiloja esiintyy hieman muita ikäryhmiä enemmän.

5. Kiitokset

Tämän artikkelin kirjoittamista ovat rahoittaneet: Suomen Akatemia HEATCLIM (No. 329306, 329307), FINEST Twins (EU Horizon 2020, No. 856602), SUREFIT (EU Horizon 2020, No. 894511) ja Suomen Akatemia ACCC (Flagship No. 337552).

Lähdeluettelo

- [1] Kollanus, V. ja Lanki, T. 2014. 2000-Luvun Pitkittyneiden Helleaaltojen Kuolleisuusvaikutukset Suomessa. Duodecim. ss. 983–990. <http://www.terveysportti.fi/xmedia/duo/duo11638.pdf> (viitattu 18.8.2021).
- [2] Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. 2019. URL: <https://thl.fi/fi/-/viime-kesan-helleaalto-lisasi-ikaantyneiden-kuolleisuutta-helteisiin-on-hyva-varautua-ajoissa> (viitattu 18.8.2021)
- [3] Ruuhela, R., Votsis, A., Kukkonen, J., Jylhä, K., Kankaanpää, S ja Perrels, A. 2021. Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves. Atmosphere, 12, 46. (<https://doi.org/10.3390/atmos12010046>)
- [4] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015. 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Helsinki.
- [5] RakMk D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö. Helsinki.
- [6] Ympäristöministeriön asetus (1010/2017). 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Helsinki.

Future Spaces -hanke tähtää sisäilman laadun parantamiseen korjauskohteissa

Juha Vinha¹ ja Jari Erkkilä²

¹ Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

² Tuotekehitys Oy Tamlink

Tiivistelmä

Future Spaces -hanke on Tampereen yliopiston, VTT:n ja yritysten yhteishanke, jonka tavoitteena on parantaa sisäilman laatua korjattavissa palvelu- ja liikerakennuksissa. Hanke koostuu tutkimushankkeesta sekä mukana olevien yritysten omista kehityshankkeista. Hankkeen tavoitteena on tuottaa palvelukonsepti, jonka avulla voidaan tarjota kokonaisvaltaisia korjaus- ja ylläpitopalveluita erilaisiin korjauskohteisiin. Hanke tähtää erityisesti ennakoivaan korjaamiseen, jossa rakennuksiin ei ole ehtinyt syntyä vielä sisäilmaongelmia ja merkittäviä kosteusvaurioita. Hankkeessa otetaan huomioon kokonaisvaltaisesti rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien vaikutukset sekä mm. energiatehokkuuden parantamisen, ilmansaasteiden ja ilmastonuutoksen vaikutukset.

1. Johdanto

Palvelu- ja liikerakennuksissa kohdataan nykyään paljon sisäilmaongelmia. Tärkeimpiä ongelmien aiheuttajia ovat erilaiset haitalliset aineet ja hiukkaset, jotka ovat peräisin ulkoilmasta, rakennuksen rakenteista, maaperästä, ilmanvaihtojärjestelmästä ja käyttäjistä. Sisäilman laatuun vaikuttaa lisäksi monet fysikaaliset tekijät, kuten lämpötila, suhteellinen kosteus, ilmavirtaukset, akustiikka ja valaistus. Nämä tekijät vaikuttavat käyttäjien viihtyvyyteen ja työtehoon ja myös niillä voi olla terveysvaikutuksia.

Sisäilmaongelmista seuraa paljon sairauspoissaoloja sekä työkyvyn ja elämänlaadun heikkenemistä. Sisäilmaongelmaisen rakennuksen korjaaminen hankaloituu ja kustannukset kasvavat. Pahimmassa tapauksessa rakennusta ei voida enää korjata, vaan se joudutaan purkamaan kokonaan.

Future Spaces -hankkeen tavoitteena on löytää ratkaisu näihin ongelmiin kehittämällä palvelukonsepti palvelu- ja liikerakennusten korjaukseen ja olosuhteiden hallintaan, joka huomioi rakennuksen iän, rakenteiden kunnon ja tiiviyn, rakennusmateriaalit ja niiden käyttäytymisen, vallitsevat paine-erot, ilmanvaihdon ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksen, lämpövihtyvyystekijät sekä ilmastonmuutoksen ja ulkoilman saasteiden vaikutukset. Konseptin on tarkoitus parantaa korjattavan rakennuksen kuntoa, sisäolosuhteita, kosteusturvallisuutta, energiatehokkuutta, käyttäjien terveyttä ja työtehoa sekä vähentää CO₂-päästöjä ja nostaa kiinteistön arvoa.

Palvelukonsepti muodostuu uudeltaisesta liiketoimintamallista, rakennuksen fysikaalisiin tekijöihin ja sisäilman olosuhteisiin liittyvästä tutkimuksesta, ja lopulta kokonaisratkaisun soveltamisesta korjattaviin rakennuksiin. Tavoitteena on erityisesti ennakoivien korjausten tekeminen, jotta rakennuksiin ei pääsisi syntyä sisäilmaongelmia ja jotta sisäilman laatu voitaisiin parantaa viihtyvyyden ja työtehon lisäämiseksi.

Korjauskohteiden laadukkaampi sisäilman olosuhteiden hallinta tarjoaa mahdollisuuden laajaan kansainväliseen liiketoimintaan. Liiketoiminta keskittyy löytämään tehokkaamman ja suoraviivaisemman tavan toteuttaa korjaushankkeita, jonka on tarkoitus hyödyttää korjausta vaativien kiinteistöjen omistajia ja käyttäjiä. Palvelukonseptin avulla pyritään tarjoamaan kokonaisvaltaisia korjaus- ja ylläpitopalveluita erityisesti Pohjoismaiden ja Saksan markkinoille.

Future Spaces -hankkeeseen on koottu tätä varten roolitettu konsortio eli ekosysteemi korkean osaamistason yrityksistä ja tutkimuslaitoksista. Myöhemmin konsortioon voi liittyä myös muita tahoja.

2. Future Spaces -tutkimushankkeen työpaketit ja sisältö

Future Spaces -tutkimushanke koostuu kaikkiaan kahdeksasta eri työpaketista, jotka on kuvattu lyhyesti alla.

TP1 Markkinat (TAU, Tietojohtaminen)

Työpaketissa 1 tutkitaan edistyneiden datapohjaisten liiketoimintamallien liiketoiminnallisia tavoitteita ja motivaattoreita, rajoittavia tekijöitä, ja hyödyntämisen yleisiä mahdollisuuksia IAQ-ekosysteemin yksittäisten keskeisten toimijoiden, toimijaryhmien ja koko ekosysteemin näkökulmasta.

TP2 Liiketoimintamallit (TAU, Tietojohtaminen)

Työpaketissa 2 tutkitaan edistyneiden datapohjaisten liiketoimintamallien käyttöönottamista, soveltamista ja hyötyjä IAQ-ekosysteemin yritysten näkökulmasta. Uudenlaiset liiketoimintamallit vaativat uudenlaisia kyvykkyksiä yrityksiltä ja koko ekosysteemin koordinoinnin osalta.

TP3 Tuottavuustarkastelut (VTT)

Työpaketissa 3 kehitetään laskentamalleja sisäilman ja lämpöviihtyvyyden kehittämisen kustannuksista ja yhteydestä työn tuottavuuteen sekä ihmisten sairastuvuuteen. Ihmiset työskentelevät tuotavimmin optimaalisissa lämpöolosuhteissa. VTT:llä on kehitetty uusi laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida tilan ominaisuuksien vaikutusta ihmisten työn tuottavuuteen tarkemmin kuin aiemmilla menetelmillä [1]. Optimaalisella lämpöolosuhteiden säädöllä on merkittävä rooli myös rakennusten energiankulutuksen vähentämisessä.

TP4 Rakenteet (TAU, Rakennusfysiikka)

Työpaketissa 4 kerätään tietoa Suomen ja muiden palvelukonseptin kohdemaiden palvelu- ja liikerakennusten rakenneratkaisuista ja vaurioista eri vuosikymmeninä sekä niihin liittyvistä nykyisistä määräyksistä ja korjausohjeista. Lisäksi tarkastellaan eri vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa kokeiden ja laskentatarkastelujen avulla. Tarkempaa tutkimusta varten etsitään kriittisiä rakenneratkaisuja, joissa tarvitaan korjauksia ja kehitetään niille korjausratkaisuja, jotka ottavat huomioon ilmastomuutoksen, lämmöneristyksen lisäyksen ja ylipaineen lisäyksen vaikutukset. Tutkimustulosten avulla kehitetään myös rakennusten kuntoarviomenettelyä ja korjausohjeita.

TP5 Sisäilman olosuhteet (TAU, Rakennusfysiikka)

Työpaketissa 5 tarkastellaan ilmanvaihdon säätöjen ja kokonaan sammuttamisen vaikutuksia palvelu- ja liikerakennusten sisäilman olosuhteisiin ja määritetään mitattavia suureita, joiden

avulla korjattavan rakennuksen sisäilman olosuhteita ja laatua voidaan seurata ja ylläpitää. Ilmanvaihdon säätöjen ja kokonaan sammuttamisen vaikutuksia tutkitaan tekemällä kenttämittauksia palvelurakennuksissa, kuten päiväkodeissa ja kouluissa, sekä toimistorakennuksissa.

TP6 Sisäilma vs. ulkoilma (TAU, Aerosolfysiikka)

Työpaketissa 6 tutkitaan sisäilman hiukkaspitoisuuksia ja hiukkasten ominaisuuksia. Tutkimuksen pääpaino on yhteistyössä projektin osapuolten ja kv-partnereiden kanssa tehtävässä kokeellisessa työssä. Erityisinä tutkimuskysymyksinä selvitetään ulkoilman laadun vaikutusta rakennusten sisäilman laatuun, tutkitaan sisäilman keuhkodepositoivan hiukkaspinta-alan pitoisuuksia ja kokojakaumia sekä selvitetään uuden, sisäilmamittauksia mahdollisesti merkittävästi suuntaavan ISO 16000-37:2019 -standardin [2] soveltuvuutta sisäilman laadun tarkkailuun.

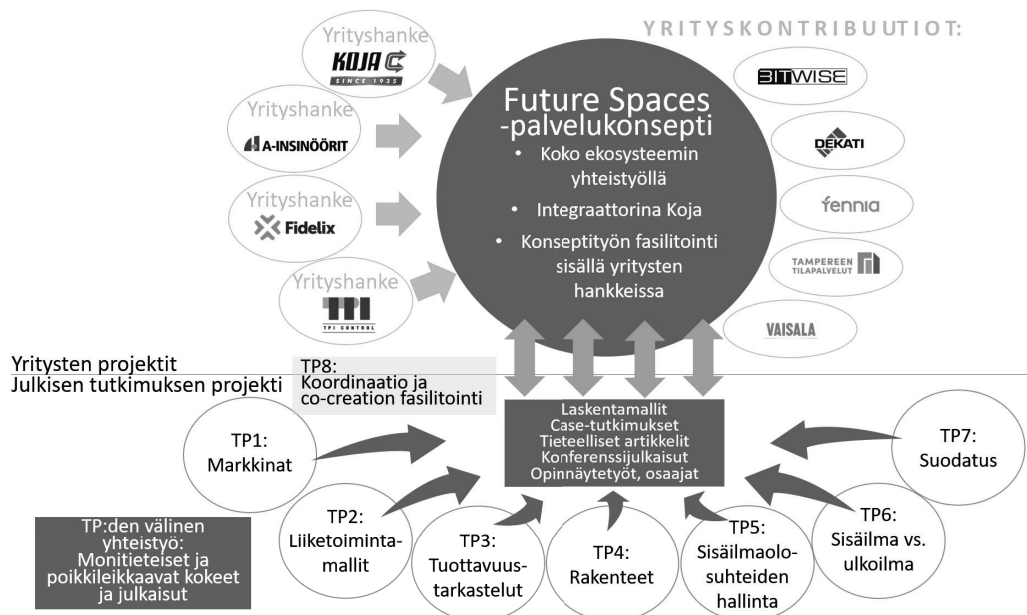
TP7 Suodatus (VTT)

Työpaketissa 7 tutkitaan uusia kestävän kehityksen mukaisia ilmanvaihdon energiantalteenoton ja ilmansuodatuksen ratkaisuja ja niiden vaikutuksia sisäilman laatuun ja ilmanvaihdon energiankulutukseen palvelu- ja liikerakennusten korjausrakentamisen ja modernisoinnin näkökulmasta. Ratkaisuja demonstroidaan työpaketin 5 case-kohteissa.

TP8 Koordinointi (Tamlink)

Hankkeessa tehdään tiivistä yhteistyötä tutkimuksen ja yritysten välillä. Tämä mahdollistetaan mm. usein toteutettavilla projektikokouksilla ja yhteisillä workshoppeilla. Projektin tulokset hyödyttävät laajasti suomalaista rakennustoimialaa, mutta ennen kaikkea tavoite on myös viestiä kansainvälisesti tuloksista mm. Indoor Air Quality ecosystemin [3] kautta.

Future Spaces -hanke on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 1.



Kuva 1. Future Spaces -hankkeen kuvaus.

3. Rakenteiden kokeellinen ja laskennallinen tutkimus

Rakennusfysiikan tutkimusryhmän vetämässä rakenteiden työpaketissa 4 tehdään vaipparakenteiden kokeellista tutkimusta Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen koerakennusalueella sekä materiaaliominaisuuksien määrittäviä laboratoriossa. Tämän lisäksi tehdään koerakenteiden toiminnan laskennallisia vertailutarkasteluja sekä tutkitaan laskennallisesti erilaisten korjattavien rakenteiden ja liitosten toimintaa eri korjaustavoilla.

Ulkoseinärakenteiden osalta verrataan erityisesti lämmönerityksen lisäyksen vaikutuksia puurunkoisten ulkoseinärakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tutkittavissa ulkoseinärakenteissa on eri lämmöneritepaksuuksilla tehtyjä rakenteita, joissa tuulensuojalevynä on käytetty kipsilevyä. Ulkoverhousten osalta verrataan myös puu- ja tiiliverhouksen käyttäytymistä keskenään. Ulkoseinien toimintaa tarkastellaan erikseen pohjois- ja eteläsuunnissa. Lämmöneristyksen lisäyksen on osoitettu heikentävän puurunkoisten rakenteiden kosteusteknistä toimintaa laskentatarkasteluissa [4], mutta nyt tätä asiaa tutkitaan myös kokeellisesti.

Yläpohjarakenteiden osalta tarkastellaan tuuletettujen puurunkoisten yläpohjien kosteusteknistä toimintaa ja erityisesti eri lämmöneristemateriaalien ja vesikatteen alle laitettavan lämpöä eristävän aluskatteen vaikutuksia. Lämpöä eristävän aluskatteen on todettu parantavan yläpohjan olosuhteita ja vähentävän sen homeutumisriskiä laskentatarkasteluissa [4]. Tätä ratkaisua on käytetty tuuletetuissa yläpohjissa jo ulkomailla, mutta Suomessa sen käyttö on ollut toistaiseksi hyvin vähäistä. Myös lämmöneristeen kosteuskapasiteetin on todettu mallinuksissa parantavan yläpohjan kosteusteknistä toimintaa [4].

Koerakenteissa käytetyn tiiliverhouksen kosteusteknisiä materiaaliominaisuuksia määritetään laboratorikokeilla. Suomessa käytettävien tiilien osalta materiaaliominaisuuksien määrittästä on varsin vähän tehty. Tavoitteena on lisäksi tarkastella tiilien ja tiilisauvojen yhteistä kosteusteknistä toimintaa ja verrata niitä pelkän tiilen käyttäytymiseen. Tulosten avulla pyritään mallintamaan tiiliverhousten toimintaa aiempaa tarkemmin.

Rakenteiden ja liitosten laskennallisissa tarkasteluissa tehdään vertailulaskelmia kokeissa olevien ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta ja tarkastellaan laskennan ja koetulosten välisiä eroja. Tämän lisäksi tehdään laskentatarkasteluja mm. massiivitiiliseinien kosteusteknisestä toiminnasta ja tarkastellaan sisäpuolisen lämmöneristyksen ja ulkopuolisen suojapinnoitteen vaikutuksia niiden toimintaan. Lisäksi tarkastellaan erilaisten liitosratkaisujen toimintaa lisäeristämisen yhteydessä ja kuinka niiden kylmäsiltaivaikutusta ja kosteusteknisiä riskejä voidaan vähentää.

4. Sisäilman olosuhteet ja seuranta rakennuksissa

Rakennusfysiikan tutkimusryhmän toisessa työpaketissa 5 keskitytään palvelu- ja liikerakennusten sisäilman olosuhteisiin. COMBI-hankkeessa saadut tutkimustulokset [5] ovat osoittaneet, että palvelurakennusten ilmanvaihto muuttuu tyypillisesti yöaikaan ja viikonloppuisin alipaineiseksi, kun rakennusten pääilmanvaihto sammutetaan ja likaisten tilojen erillispoistot jätetään päälle. Tämä ilmiö lisääntyy entisestään, jos rakenteita korjattaessa niiden ilmatiiviyttä parannetaan.

Tässä työpaketissa tutkitaan ratkaisua, jossa ilmanvaihto sammutetaan kokonaan poissaoloaikoina, eli myös erillispoistot sammutetaan. Tutkimuksessa seurataan useita sisäilman

olosuhteita (lämpötilaa, suhteellista kosteutta, paine-eroja, CO₂-pitoisuutta, PM-hiukkaspitoisuutta, TVOC-pitoisuutta, radonpitoisuutta ja kuitumääriä) ja arvioidaan mittausten ja käyttäjähaastattelujen avulla ilmanvaihdon kokonaan sammuttamisen vaikutuksia näihin olosuhteisiin. Aluksi tehdään mittauksia ja haastattelut nykyisissä rakennusten käyttöolosuhteissa. Tämän jälkeen ilmanvaihdon toimintoja muutetaan siten, että se sammuu poissaoloaikoina kokonaan. Mittauksia jatketaan ja haastattelut tehdään myös tässä tilanteessa.

Tutkimuksessa on mukana yhteensä 14 koekohdetta lähinnä Tampereelta ja ympäristökunnista. Näistä on kouluja 4 kpl, päiväkoteja 4 kpl, yhdistettyjä kouluja/ päiväkoteja 4 kpl ja toimistorakennuksia 2 kpl. Kohteista 10 on Tampereelta, kolme Tampereen ympäristökunnista ja lisäksi yksi toimistorakennus Helsingistä.

Mitattavia sisäilman olosuhteita on nykyisin varsin paljon ja niiden kaikkien seuranta sisäilman laadun arvioimiseksi on työlästä ja hankalaa. Sisäilman olosuhteita voidaan mitata mm. seuraavilta osa-alueilta:

- sisäilman fysikaalisten suureiden mittaukset (lämpötila, kosteus, paine-ero ja ilmavirtaus)
- kemiallisten yhdisteiden, hiukkasten ja kuitujen mittaukset
- sisäolosuhteiden viihtyvyyssmittaukset
- ilmanvaihdon mittaukset
- akustiset mittaukset
- valaistusmittaukset
- ilmansaasteiden (hiukkasten) sisä- ja ulkoilman mittaukset

Tutkimuksen aikana on kartoitettu tähän mennessä yhteensä n. 50 sisäilmasta mitattavaa asiaa, joita voidaan käyttää sisäilman laadun arvioinnissa.

Näiden lisäksi sisäilman laadun arvioinnissa tarvitaan tyypillisesti myös rakenteiden toiminnan ja kunnan arviointia, joihin liittyen voidaan tehdä useita erilaisia mittauksia ja tarkasteluja sekä rakenteiden pinnoilta että niiden sisältä.

Työpaketin yhtenä tavoitteena on myös määrittää sellaiset mitattavat suuret, jotka ovat keskeisimmät sisäilman laadun arvioinnissa. Luonnollisesti myös rakennuksen kunto vaikuttaa mitattaviin ja seurattaviin asioihin. Ennakoivassa korjauskohteessa mitattavia suureita voi olla vähemmän kuin sisäilmaongelmaisessa kohteessa.

5. Tutkimusorganisaatio ja aikataulu

Future Spaces -tutkimushankkeen toteutukseen osallistuu kolme tutkimusryhmää Tampereen yliopistosta (Rakennusfysiikka, Aerosolifysiikka ja Tietojohdaminen) ja VTT, sekä yrityksiä, kansainvälisiä yliopistoja ja tutkimuslaitoksia.

Yrityskonsortion muodostavat Koja Oy, A-Insinöörit Suunnittelu Oy, TPI Control Oy, Fidelix Oy, Tampereen Tilapalvelut Oy, Fennia Kiinteistöt Oy, Dekati Oy, Vaisala Oyj ja Bitwise Oy. Koja Oy toimii yrityskonsortion veturiyrityksenä.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana ja tutkimusosuuden koordinaattorina toimii professori Juha Vinha (TAU, Rakennusfysiikka) ja projektipäällikkönä väitöskirjatutkija Petteri Huttunen (TAU, Rakennusfysiikka). Aerosolifysiikan tutkimusryhmästä vastuuhenkilöinä ovat assoc. prof. Topi Rönkkö ja TkT Panu Karjalainen ja Tietojohdamisen tutkimusryhmästä prof. Hannu Kärkkäinen

ja TkT Karan Menon. VTT:n osuuden vastuullisena johtajana toimii Vice President Tuula Mäkinen ja projektipäällikkönä Hannu Salmela. Koko hankkeen koordinaattorina toimii Jari Erkkilä Tuotekehitys Oy Tamlinkista.

Tutkimusosuuden kokonaisrahoitus on 1,78 M€ ja koko hankkeen rahoitus sisältäen yritysten omat tuotekehitysprojektit yhteensä n. 3,7 M€. Hankkeen rahoittajina ovat Business Finland, Tampereen yliopisto ja VTT sekä mukana olevat yritykset. Projekti on myös osa Business Finlandin sisäilman laadun kasvumootorin IAQe:n (Indoor Air Quality ecosystem) toimintaa.

Future Spaces -hankkeen kesto on 1.9.2020–31.8.2022.

6. Yhteenveto

Future Spaces -hanke tähtää sisätilojen ilmanlaadun parantamiseen korjattavissa palvelu- ja liikerakennuksissa. Tutkimusta tehdään kokonaisvaltaisesti keskeisten sisäilman laatuun vaikuttavien osatekijöiden osalta sisältäen mm. rakenteisiin, ilmanvaihtoon, sisäilman olosuhdemittauksiin, ilman suodatukseen sekä ulkoilman saasteisiin liittyvää tutkimusta. Hankkeen tavoitteena on kehittää palvelukonsepti ennakoivaan korjaukseen ja olosuhteiden hallintaan. Palvelukonseptin avulla pyritään tarjoamaan kokonaisvaltaisia korjaus- ja ylläpitopalveluita erityisesti Pohjoismaiden ja Saksan markkinoille.

Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän työpakteissa tarkastellaan rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa sekä kokeellisesti että kaskennallisesti ja mitataan sisäilman olosuhteita useista palvelu- ja toimistorakennuksista.

Lähdeluettelo

- [1] Ala-Juusela, M. & Shukuya, M. 2014. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland. *Energy and Buildings*, Vol. 76, June, pp. 249–257.
- [2] ISO 16000-37:2019. Indoor air – Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration. 12 p.
- [3] Indoor Air Quality ecosystem – Healthy Indoor Air. <https://www.iaqe.fi/>
- [4] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 354 s. + 43 liites.
- [5] Vinha, J., Laukkarinen, A., Kaasalainen, T., Pihlajamaa, P., Teriö, O., Jokisalo, J., Annala, P., Harsia, P., Hedman, M., Heljo, J., Kallioharju, K., Kauppinen, A., Kero, P., Kivioja, H., Lehtinen, T., Marttila, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Paatero, J., Raunima, T., Ruusala, A., Sankelo, P., Sekki, P., Sirén, K., Tuominen, E., Tuominen, O., Uotila, U. & Uusitalo, S. 2019. Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tutkimusraportti 168, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laboratorio, Rakennetekniikka. 45 s. + 111 liites.

Tulevaisuuden tilat ja paremmat sisäilmasto-olosuhteet (Future Spaces)

Antti Souto, Timo Vuolle, Sami Musakka ja Lari Eskola
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Sisäilmasto-olosuhteisiin liittyvät ilmanvaihdon ja rakenteiden tutkimusten tulokset ovat vaikuttaneet tutkimusten suorittamiseen sekä tutkijoilta vaadittavaan pätevyYTEEN. Vaikka sisäilmastoon liittyviä ongelmia on pystytty ratkaisemaan, niin tästä huolimatta sisäilmaongelmat ovat yleisiä monissa rakennuksissa.

Sekä rakenteiden että ilmanvaihdon osa-alueiden tutkimusohjeistus on kehittynyt viimevuosikymmenen aikana erittäin paljon. Tutkimusten haasteeksi on noussut tutkijoilta vaadittava laaja-alainen osaaminen sekä ongelmien selvittämiseksi tarvittava koko kiinteistön kattavien laajojen tutkimusten tarve.

Tällä hetkellä erityisenä haasteena tutkimusten suorittamisessa on rakenteiden ja ilmanvaihtojärjestelmien ongelmien laaja-alaisuus sekä tarpeellisten tutkimusten kohdentaminen rakennuksessa.

Tampereen yliopiston Future Spaces -hankkeessa pyritään hakemaan uudenlaista lähestymistapaa tuottaa laadukas sisäilmasto kehitettävien katselmus ja mittausten avulla.

1. Johdanto

Nykyisen rakennuskannan rakenteiden ja ilmanvaihdon ongelmien selvittämiseksi on tehty paljon erilaisia rakenteisiin ja ilmanvaihtoon liittyviä tutkimuksia 80-luvulta lähtien. Näiden tutkimusten avulla on pyritty selvittämään rakennusten rakennusfysikaalista toimintaa, koska käyttäjät ovat kokeneet rakennuksessa sen sisäilmastoon liitettyä oireilua. Tutkimusten perusteella on tehty useita ohjeita rakenteiden suunnitteluun ja korjaussuunnitteluun, rakennusten tutkimiseen ja niiden korjaamiseen liittyen.

Viimeisimmät tutkimus- ja korjausohjeet [123] tarjoavat laajan näkemyksen rakennusten sisäilmasto-ongelmien selvittämiseksi. Oppaiden ja ohjeiden avulla saadaan kokonaisvaltaisesti hyvä käsitys ongelmien moninaisuudesta ja niiden korjaamisen haastavuudesta. Mahdollisesti haastavimpana ongelmana tällä hetkellä on tutkimusten kohdistaminen oikeiden vauriokohtien ja niiden laajuuden tutkimiseen ja selvittämiseen.

Haasteena on myös, että rakennuksiin kohdistuvat laajamittaiset tutkimus- ja korjaustoimenpiteet eivät välttämättä kuitenkaan johda toivottuun lopputulokseen rakennuksen omistajan tai käyttäjien kannalta. Miten voidaan varmistaa sekä uusille että peruskorjattaville rakennuksille, että niiden tarjoamat sisäilmasto-olosuhteet ovat riittävän hyvät nyt ja tulevaisuudessa.

Tässä artikkelissa käsitellään ilmanvaihdon ja rakenteiden kuntotutkimusten tutkimusprosesseihin liittyvien haasteita sekä tuodaan esiin tutkimusten toteutukseen liittyviä näkökulmia.

Tutkimusprosessit on käsitelty tarkemmin lähdemateriaalissa [1,2]. Hyvään sisäilmaston luomisen haasteisiin pyritään löytämään ratkaisuja Tampereen yliopiston Future Spaces Co-innovation – hankkeessa.

Artikkeli liittyy Future Spaces tutkimushankkeeseen A-Insinöörit yrityksen osuuteen. Future Spaces hanketta rahoittavat hankkeeseen osallistuvat yritykset ja Business Finland.

2. Sisäilmasto-olosuhteiden hallinta: ilmanvaihto ja rakenteet

Ilmanvaihdon ja rakenteiden vaikutusta sisäilmaan on tutkittu lukuisissa tutkimuksissa. Tärkeinä tuloksina tähän mennessä ovat olleet käyttäjille oireilua aiheuttavat löydökset sekä niiden perusteella tehdyt uudet ohjeet rakenteiden ja ilmanvaihdon suunnitteluun ja toteutukseen. Tulosten avulla on mahdollista tavoitella parempaa sisäilmastoa.

Ilmanvaihdon osalta on pyritty riittävään ilmanvaihtoon [5] sekä vähentämään hallitsematonta vuotoilmanvaihtoa ottamalla huomioon rakennuksen painesuhteet [4]. Painesuhteiden hallinnalla pyritään kompensoimaan järjestelmien ja tilojen mittaamisen ja säädön epätarkkuutta. Painesuhteiden mittaamisella on myös mahdollista selvittää järjestelmien toimimattomuudesta sekä järjestelmien rikkoutumisesta johtuvia ongelmia ilmanvaihdossa. Myös SuLVIn ilmanvaihdon kuntotutkimusohjeet ovat tuoneet ilmanvaihdon kuntotutkimuksiin tarvittavaa kokonaisuuden hallintaa [1].

Rakenteiden osalta tilanne on tällä hetkellä haastavampi. Rakenteet vaikuttavat sisäilmaan ilmavuotojen mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien, materiaalipäästöjen ja mahdollisten vaurioiden kautta. Rakenteet vaikuttavat myös laajemmin sisäilmastoon yhdessä taloteknisten järjestelmien kanssa (esimerkiksi sisätilojen lämpöolosuhteisiin). [3]

Rakenteista sisäilmaan epäpuhtauksia aiheuttavat mm.:

- Mikrobit, radon, haitta-aineet.
- Alapohjissa ongelmana radon ja maaperän mikrobit.
- Vanhoja täytettyjä välipohjia.
- Rakenteissa on kosteus- ja vedenerityksinä ”Bitumisivelyitä”.

Rakenteissa ongelmien syitä on vaikeampi havaita ja paikallistaa, koska monesti vaurioituneet tai ongelmia aiheuttavat rakenteet sijaitsevat toisten rakenneosien sisällä. Myös vauriokohdan laajuutta on monesti mahdotonta määritellä pelkästään yksinkertaisin aistihavainnoin tai rakenteen pinnalta tehtävillä mittauksilla. Ympäristöministeriön ohje Rakennuksen kosteus ja sisäilmatekninen kuntotutkimus [2] antaa tutkijoille hyvän lähtökohdan tehdä kokonaisvaltainen tutkimus rakennuksen ongelmista.

Rakenteiden korjaamisessa korostuu kokonaisuuden huomiointi, koska rakenneosien uusimisen kustannus on usein merkittävä. Lisäksi korjaukset tulisi kohdistaa oikein ja välttää ylikorjaamista sekä sovittaa rakennuksen muihin korjauksiin. Rakenteita korjattaessa on lähtökohtaisesti selvítettävä niiden jäljellä oleva käyttöikä ja tarkistettava koko rakennuksen peruskorjauksen arvioitu ajankohta. Rakennuksiin kohdistuvia tutkimuksia suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon rakennuksen elinkaari sekä huomioida, että rakenteillakin on rajallinen elinkaari.

Yleisesti korjauksia tehtäessä pitäisi ottaa huomioon eri näkökulmia (mm. energiatehokkuus ja elinkaari). Osittaiset korjaukset voivat muodostaa huomattavia kustannuksia, mutta eivät välttämättä saavuta laajemman korjauksen laatutasoa sisäilmaston kannalta. Osittaisissa

korjauksissa tulisi aina varmistua kokonaisuuden toimivuudesta huomioimalla rakenteet sekä ilmanvaihto ja talotekniikka kokonaisuutena riittävästi. [3]

3. Rakennusten kuntotutkimukset

Kuntoarvio ja kuntotutkimus on määritelty seuraavasti [2]:

- Kuntoarviossa arvioidaan pääosin aistinvaraisin menetelmin tilojen, rakenneosien, järjestelmien ja ulkoalueiden kunto sekä korjaustarve. Osana kuntoarviota laaditaan ehdotus kunnossapitosuunnitelmasta. Kuntoarvio tulisi uusaa tai päivittää viiden vuoden välein.
- Kuntotutkimuksen lähtökohdista ovat havaitut sisäilmaongelmat, vuoto- tai vauriohavainnot sekä peruskorjauksen suunnittelu. Kuntotutkimus tehdään tarvittavassa erikseen määriteltävässä laajuudessa ja usein käytetään rakenteita rikkovia menetelmiä tutkimusmenetelmiä.

SuLVI:n Ilmavaihdon kuntotutkimus antaa tarkempia ohjeita ilmanvaihtojärjestelmiä koskien ja on määritelty seuraavasti:

- Ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmien ja laitteiden kunto selvitetään kuntotutkimuksilla (IV-kuntotutkimus). Samalla selvitetään järjestelmien soveltuvuus rakennuksen nykyisen tai rakennukselle suunnitellun käytön kannalta.

IV-kuntotutkimusmenettely liittyy usein myös rakennuksessa todetun sisäilmaongelman selvittämiseen ja sen edellyttämään korjausselvitykseen. IV-kuntotutkimus voidaan käynnistää myös rakennuksen energiatalouden parantamismahdollisuuksien selvittämiseksi. IV-kuntotutkimus täydentää ja syventää kuntoarvion ja energiakatselmuksen tuloksia ilmanvaihdon ja ilmastoinnin osalta. [1]

Haasteeksi on osoittautunut kuntotutkimuksen rajaaminen sekä tutkijoiden että tutkimuksen tilaajien osalta. Vaikeutta on lisännyt tutkimusohjeistuksen laaja kattavuus. Tutkimusta pitäisi pystyä rajaamaan järkevästi, jotta voidaan tuottaa riittävän laajasti tietoa iv-järjestelmän sen hetkisestä tilasta, että päätökset jatkotoimista pystytään tekemään.

IV-kuntotutkimus jakautuu kahteen osaan: perusosaan ja yksityiskohtaisiin tutkimuksiin. Perusosan tärkein tehtävä on ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmien (IV-järjestelmien) yleisarviointi eli arviointi siitä, miten järjestelmä vastaa nykyisen tai suunnitellun käytön vaatimuksia. Yleisarvioinnin tuloksena saadaan suositukset siitä, mitä IV-järjestelmille on tehtävä vaatimusten saavuttamiseksi.

Ohjeistuksessa esitetään seuraavaa: jos on ilmeistä, että järjestelmä ratkaisuihin ei täytä tai ole korjattavissa vaatimuksia vastaavaksi, ei yksityiskohtaisia tutkimuksia ole tarpeen suorittaa. Mikäli rakennuksen käyttöä on kuitenkin tarkoitus jatkaa, niin harvoin tilaaja on varautunut taloudellisesti siihen, että koko ilmanvaihto järjestelmä on täysin elinkaaren lopussa. Yleensä joudutaan tekemään selvitys mitkä komponentit uusimalla järjestelmälle saadaan vielä muutama vuosi elinkaarta jatkettua, jotta uudelle järjestelmälle saadaan hankittua rahoitus sekä selvitettyä, että minkälainen uuden järjestelmän tulisi olla.

Rakenteiden osalta tavoitellaan elinkaaren jatkamista sisäilmaston kannalta. Tähän on jo nyt olemassa hyviä tutkimusohjeita ja menetelmiä [2,3].

4. Rakennusten sisäilmastokatselmus

Katselmustoimintaa varten on luotava kevyempi menetelmiä, jotta voidaan varmistaa ja kohdentaa, että rakennuksen tarkemmat tutkimukset tulee tehtyä riittävän laajasti. Myös jaksottaisten huoltotoimenpiteiden ja eri ajanjaksoina tehtävät korjaukset on otettava huomioon rakennuksen elinkaarisuunnittelussa. Myös tilan käyttäjiltä saatavaa palautetta on käsiteltävä siten, että sen kautta voidaan kohdistaa erilaiset katselmus ja tutkimustoimenpiteet tarpeenmukaisesti.

Kun SuLVI:n ilmanvaihdon kuntotutkimusta käytetään apuna sisäilmaongelmien ratkaisemiseksi, liittyy sisäilmaongelmiin tavallisesti tilan käyttäjien kokema puutteellinen sisäilmalaatu ja siihen liittyvät oireet. Ilma voi tuntua tunkkaiselta ja loppupäivästä särkeä päätä ja olla poikkeavaa väsymystä. [1]

Nykyisin käytössä olevat erilaiset kuntoarvion toimintamallit ovat pohjana, kun yritetään kehittää sopivaa toimintamallia sisäilman huomioonottavalle katselmus- ja katsastustoiminnalle. Mallissa pyritään rajaamaan tarkastelu sisäilmastoon vaikuttaviin tekijöihin. Tällä pyritään saamaan kuntoarvioita kevyempi ja laajemmin käyttökelpoinen selkeä toimintamalli. Toimintamallissa pyritään kuitenkin hyvään dokumentaatioon selvitettävien asioiden osalta, jotta lähtötiedot olisivat käytettävissä tutkimuksia ja muita jatkotoimenpiteitä suunniteltaessa.

Sisäilmastoon kohdistettavalla kuntoarviolla ja katselmuksella on tavoitteena tuottaa:

- Selkeää tietoa kiinteistön tilasta omistajalle ja käyttäjille.
- Selkeitä vaihtoehtoja rakennuksen sisäilmaston laatutason parantamiseen.

Ohjeet rakennusten kuntotutkimuksista ja korjauksesta ovat ongelmalähtöisiä ja painottuneet vaurioiden löytämiseen ja niiden korjaamiseen. Tällöin pyritään korjaamaan vaatimukset täyttävään vähimmäistasoon, mutta korjattaessa voi olla syytä harkita myös kattavampaa sisäilmaston laatutason parannusta. Tulevalla toiminnalla pyritään sisäilman laadun kannalta ennakoivaan toimintaan, jossa voitaisiin välttyä päätyä ongelmien asti.

Rakennneosien osalta arvioidaan niiden kuntoa, käyttöikä sekä toimivuutta. Kunnan ja käyttöiän arviointiin on useita eri ohjeita mm. rakennneosittain ja eri materiaaleille. Myös toimivuutta ja mahdollisuuksia parantaa rakenteen toimivuutta pitäisi arvioida esimerkiksi kosteusteknisestä näkökulmasta. Nykyisin on tiedossa, että tulevaisuuden ilmasto vaatii enemmän rakenteiden kosteustekniseltä toimivuudelta. Myös tästä näkökulmasta pitäisi nykyisin tarkastella rakennusten korjaustarvetta jo ennen vaurioiden syntymistä. Tällöin saavutetaan mahdollisimman pitkä elinkaari rakennuksille. Tietoa aiheesta saadaan jatkuvasti aihepiirin tutkimuksesta, mutta tietoa ei ole vielä kootusti saatavilla. Kerättävä tieto on tarkoitus siirtää myös rakentamisen ohjeistuksiin.

Käyttäjien kokemukset sisäilman laadusta ja rakennusten kunnosta ovat hyvin kirjavia. Katselmustoiminta antaa paremman ja selkeämmän kuvan rakennuksen tilasta myös rakennusten käyttäjille.

Katselmuksessa tulee ilmi myös rakennuksen ylläpidon ja korjauksen suunnitelmallisuus. Katselmusmenettely toimii osaltaan myös rakennuksen ylläpidon ja huollon tarkastustoimintana, mikä mahdollistaa ylläpidossa mahdollisesti ilmenevien puutteiden korjaamisen riittävän ajoissa. Tuleva korjaustarve voidaan tuoda esille aikaisessa vaiheessa, jotta siihen pystytään varautumaan taloudellisin resurssein.

Mikä on se vaihe, jolloin ilmanvaihto järjestelmän kuntotutkimus on liian raskas menetelmä järjestelmän toiminnan arviointiin ja mitä järjestelmästä tulisi tietää ennen tutkimuksia? Haasteeksi nousee riittävien tietojen hankkiminen nykytilanteesta sekä lähtötietojen puutteet. Ilmanvaihtojärjestelmän soveltuvuutta rakennuksen ja käyttäjien tarpeisiin ei välttämättä ole selvitetty aiemmin ja ongelmat tulevat esiin käyttäjien havaintojen kautta. Pelkästään ilmanvaihdon kuntotutkimusmenettelyllä voi olla raskasta lähetä selvittämään ongelmien syytä, jos rakennuksessa ei ole aiemmin tehty minkäänlaisia tarkastuksia tai tutkimuksia.

Tällä hetkellä käynnissä olevalla FINVAC:in ilmanvaihdon katsastus menettely voisi tuoda tarvittavaa selvennystä lähtötietojen hankintaan perusosan tilanteen selvittämiseksi ennen kuin on tarpeen lähteä raskaampiin tutkimustoimiin.

Sisäilmastokatselmus ja -tutkimus tulisi jakaantua taulukossa 1 esitetyllä tavalla.

Taulukko 1. Sisäilmastokatselmus- ja tutkimus

Osa alue	Katselmus ja tarkastus	Tutkimus	Seuranta
Rakenteet	Rakentamisen aikana tehtävät vastaanotto-tarkastukset ja vuosikatselmuksset. Elinkaarelle sijoittuvat katselmuksset (2 v, 8 v, 10 v, 15 v 20 v.)	Rakennuksen kosteus- ja sisäilmastotekninen kuntotutkimus	Rakennekosteudet ja elinkaari
Ilmanvaihto	Vastaanottokatselmus ja toiminnan tarkastukset: ilmanvaihto ja painesuhteet, järjestelmän puhtaus Ilmanvaihtojärjestelmien katsastusmenettely	SuLVIn ilmanvaihdon kuntotutkimus	Jatkuvat mittaukset, rakennusautomaatio ja muut ilman laadun seurantamittaukset

Voisiko selkeällä katsastusmenettelyllä olla paikkansa, kun tulevaisuudessa arvioidaan rakenteiden ja ilmanvaihdon toiminnan tasoa ja niiden käytännön toimintaa verrattuna suunniteltuun. Seurantamittaukset ovat välttämättömyys, joko jatkuvana tai jaksottaisena, jos halutaan varmistaa rakennuksen terveellisyys käyttäjille elinkaaren aikana. Katselmus- ja tarkastusmenettelyille on kuitenkin luotava selkeä ohjeistus ja tavoitearvot.

5. Yhteenveto

Tulevaisuudessa halutaan parempaa sisäilmastoa ja toimivaa ilmanvaihtoa, mutta pystymmekö nykytiedolla määrittämään ne keinot, joilla hyvä sisäilmasto voidaan saavuttaa. Ilmanvaihdon ja rakenteiden kuntotutkimuksilla voidaan selvittää nykyisessä rakennuskannassa sisäilmastoon haitallisesti vaikuttavia tekijöitä paljon. Jatkossa tulisi kuitenkin pyrkiä siihen, että ilmanvaihdon ja rakenteiden toimivuus voidaan varmistaa jo ennen kuin ne aiheuttavat käyttäjille ongelmia sisäilmastoon liittyen.

Tarvitaan uudenlaisia varmistus-, tarkistus- ja katsastusmenettelyitä, jotta hyvä sisäilmasto voidaan taata koko rakennuksen elinkaaren ajan.

Lähdeluettelo

- [1] Ilmanvaihdon kuntotutkimusoheet. SuLVI. <https://sulvi.fi/materiaalipankki/iv-kuntotutkimushanke/>
- [2] Miia Pitkäranta. Rakennuksen kosteus ja sisäilmatekninen kuntotutkimus YM 2016
- [3] Weijo, Inari; Lahdensivu, Jukka; Turunen, Timo; Ahola, Susanna; Sistonen, Esko; Vornanen-Winqvist, Camilla; Annila, Petri; Ala-Hakuni, Mikko; Hakanen, Janina; Häärkönen, Tyko. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus Ympäristöministeriön julkaisuja 18, Rakennustieto 2019. s 284 YM. Korjausopas
- [4] Rakennusten paine-erojen mittausohje, loppuraportti 11.10. 2019, kommenttiversio, <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> (17.1.2021)
- [5] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Asetuksen voimaantulopäivä 1.1.2018. Ympäristöministeriö 2017.

A6. Rakenteiden home- ja kosteusvauriot ja korjaaminen

Korjaustavan valinta kosteusvaurioituneessa rakennuksessa

Janina Hakanen, Inari Weijo ja Timo Turunen
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Korjaustavan valinnan keskeisimpiä tekijöitä ovat käytävissä olevat lähtötiedot rakennuksen kunnosta ja vaurioiden laajuudesta. Kuitenkin tilaajan tarpeet ja toiveet, kuten korjaushankkeeseen varatut taloudelliset resurssit usein karsivat ja keventävät korjausmenetelmää. Lisäksi valittuun korjausmenetelmään voi tulla muutoksia hankkeen edetessä esimerkiksi urakoitsijan toimesta, jolloin korjaustapaa uudelleenarvioidaan hankkeen eri vaiheissa. Tutkimuksen perusteella kosteusvauriokorjaushankkeissa esiintyviä ongelmia ja kehitysalueita ovat kuntotutkimusten laatuun ja laajuuteen sekä lähtötietojen saatavuuteen ja pirstaleisuuteen liittyvät puutteet, pitkän tähtäimen suunnitelmallisuuden puute, puutteet yleisessä tiedonkulussa, puutteet laadunvarmistustoimenpiteiden selkeässä esitystavassa sekä niiden tärkeyden ymmärtämisessä niin suunnittelijoiden kuin urakoitsijan puolesta. Lisäksi ongelmina näkyivät puutteet suunnitelmien tarkastuksessa sekä korjausten onnistumisen seurannan puute. Korjaushankkeen onnistumisen tärkeimpiä kulmakiviä ovat tavoitteiden mukaisen korjaustavan valinta, korjausten laadunvarmistus, tiivis yhteydenpito ja keskustelu korjaustavan valinnasta sekä valinnan arvioiminen hankkeen aikana.

1. Johdanto

Suomen rakennuskannassa esiintyy runsaasti kosteus- ja mikrobivaurioita sekä sisäilmaongelmia. Vaikka korjausrakentamiseen on mittavasti viime vuosina panostettu, on arvioiden mukaan edelleen jopa viidennes julkisista palvelurakennuksista mikrobivaurioitunut merkittävästi [1]. Sisäilmaongelmia esiintyy myös juuri korjatuissa rakennuksissa, minkä takia käytettyjä korjausmenetelmiä on kritisoitu ja korjaushankkeen osapuolten sisäilmaosaamista on pidetty osittain puutteellisena. Jotta rakennukset toimisivat terveellisinä ja turvallisina elinympäristöinä, tulee korjaustyöt suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman hyvin. Tämä vaatii rakennuksessa ilmenneiden ongelmien ja niiden syiden tunnistamista sekä oikean korjaustavan valintaa [2].

Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -opas [2] esittelee korjausrakentamisen prosessin ja keskittyy seikkaperäisemmin esittämään eritasoisia korjaustapoja teknisistä näkökulmista. Korjausmenetelmän valintaan voivat vaikuttaa teknisten näkökulmien lisäksi kuitenkin myös useat muut tekijät, kuten taloudelliset resurssit sekä tilaajan tai urakoitsijan tavoitteet. Nämä tekijät voivat johtaa korjaustavan keventämiseen tai korjausten karsimiseen, vaikka korjausten tekninen tarve olisi eri. Teknisen tarpeen ja muiden korjaustavan valintaan vaikuttavien tekijöiden yhteensovittaminen onkin toisinaan monimutkainen prosessi, jossa korjaussuunnittelijalta vaaditaan ammattitaitoa, jotta rakennuksia ei ”ali- tai ylikorjattaisi”.

Korjaussuunnittelijoiden käytännön kokemus on, etteivät nykyiset rakennesuunnittelun ohjenuoriksi laaditut tehtäväluettelot [3] palvele täysin korjaussuunnittelun etenemistä ja ohjausta, sillä tehtäväluettelot on laadittu pääosin uudisrakentamisen näkökulmasta ja niissä korjausrakentaminen on otettu huomioon ainoastaan erityistehtävien avulla. Käytännössä siis korjaussuunnittelun näkökulmasta keskeisiä vaiheita jää liian vähäiselle käsittelylle.

2. Tutkimusmenetelmät ja -aineisto

Artikkelin pohjana toimii diplomityö, jossa tarkasteltiin Suomen korjausrakentamiseen liittyviä tutkimuksia, oppinäytetöitä ja ohjeita. Lisäksi korjaussuunnittelijoille kohdistettiin kysely- (n=30) ja haastattelututkimukset (n=10), joiden avulla kerättiin kokemusperäistä tietoa korjausmenetelmän valintaan liittyvistä tekijöistä. Tietoa kerättiin myös korjaussuunnittelijoille järjestetyn työpajan avulla (n=27). Tutkimuksen perusteella laadittiin korjausmenetelmän valintaprosessin selkeyttämiseksi prosessikaavio, jonka tarkoituksena on toimia ohjenuorana suunnittelijoille korjaustavan valinnan arvioimisessa.

Korjaussuunnittelijoille kohdennetun tutkimuksen jälkeen vastaavanlainen kyselytutkimus toteutettiin myös tilaajan ja rakennuttajien edustajille (n=25).

3. Korjaustavan valintaan vaikuttavat tekijät

Valittavan korjaustavan tulisi ensisijaisesti poistaa vaurion aiheuttama terveyshaitta [2], [4], [5]. Korjaussuunnittelijoiden kokemuksen mukaan useimmiten korjaustavan valintaan vaikuttavat rakennuksen tekniseen kuntoon liittyvät tekijät, kuten rakenteiden vauriot sekä kuntotutkimuksen perusteella ehdotetut toimenpiteet. Tällöin korjausmenetelmän valintaprosessia ohjaavat hankkeen lähtötiedot eli muun muassa tieto rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta, rakenteiden käyttöiästä, rakenteissa esiintyvistä epäpuhtauksista ja haitta-aineista, rakenteiden tiiviydestä sekä vaurioiden laajuudesta ja laadusta [2]. Jotta kiinteistön tekninen korjaustarve saadaan kattavasti selvitettyä, vaaditaan korjaustavan valintaprosessissa ammattitaitoa ja kokemusta sekä korjaussuunnittelijalta että kuntotutkimuksen suorittavalta kuntotutkijalta.

Korjaushankkeessa ei aina voida valita teknisesti parasta ratkaisua, vaan korjaukset ovat usein kompromissi tilaajan, käyttäjien, eri alojen suunnittelijoiden sekä urakoitsijan toiveista ja tarpeista. Tutkimuksen perusteella useimmiten korjausten keventämiseen päädytään korjauksiin varattujen vähäisten taloudellisten resurssien sekä tilaajan tahtotilan ja puutteellisen ammattitaidon takia. Asiantunteva tilaaja tunnistaa usein paremmin eri korjausvaihtoehtojen riskit, jolloin korjauksissa useimmiten tavoitellaan perusteellisimpia toimia ja hankkeisiin saadaan varattua isompi budjetti. Vaikka korjaussuunnittelija on hankkeessa se, joka arvioi korjaustarvetta ja korjausajankohtaa, tekee tilaaja lopullisen valinnan korjaustavasta. Tilaajan päätöksenteon tulisi ensisijaisesti perustua kiinteistön pitkän tähtäimen suunnitelmaan (PTS), mutta korjaussuunnittelijoiden kokemuksen mukaan erityisesti pienemmissä projekteissa on hyvin yleistä, että pitkän tähtäimen suunnitelmallisuus puuttuu lähes kokonaan. Tällöin korjaukset ovat paikallisia ja enemmän ongelmalähtöisiä kuin suunnitelmallisia. Vaikka kohteen korjaus saisi alkunsa kosteusvauriosta, kiinteistöön jo laadittu PTS ohjaa myös näissä tilanteissa korjaustavan valintaa ja korjauslaajuutta. Kiinteistönomistajilla voi myös olla strategiana esimerkiksi vuokralla olevissa tai myytäväksi aiotuissa tiloissa toteuttaa kohteeseen mahdollisimman korkean tuoton saavuttamiseksi vain välttämättömiä korjauksia.

Teknisen korjaustarpeen, tilaajan toiveiden, tarpeiden ja ammattitaidon sekä rajattujen taloudellisten resurssien lisäksi korjaustavan valintaa voivat ohjata korjausten vaikutus rakennuksen ulkonäköön, viihtyvyyteen ja arkkitehtuuriin, korjaushankkeen kesto sekä ympäristöstävällisyys [6]. Mikäli tilat ovat käytössä korjaustöiden ajan, vaikuttavat korjaustavan valintaan lisäksi korjaustyön aikaiset haitat korjauskohteen käytölle. Toiminta kohteessa, kuten sairaaloissa ja teollisuuden prosessitiloissa, voi olla kriittistä, jolloin korjaustapa ei saa, rakentamiskustannuksellakaan, keskeyttää tai häiritä toimintaa. Myös kaupunki ja kunta asettavat tiettyjä rajoituksia korjaustavan valintaan kaavamääräysten ja suojellusten näkökulmien kautta [7].

Korjaustavan valintaan ja erityisesti korjausajankohtaan voivat vaikuttaa korjausten liittäminen muiden korjausten yhteyteen ja työvoiman saatavuus [6]. Valintaan voi myös vaikuttaa esimerkiksi lähestyvä peruskorjaus, jolloin korjausta voidaan siirtää tai joskus myös aikaistaa. Kosteus- ja sisäilmateknisen korjaus -oppaan [2] mukaan korjaushankkeen kiireellisyyteen ja laajuuteen tulisi kuitenkin ensisijaisesti vaikuttaa tilojen altistumisolosuhteiden ja terveellisyysarvioinnin. Altistumisolosuhteiden ja terveellisyysarvion perusteella voidaan päätyä suppeampiin tai laajempiin korjaustoimenpiteisiin kuin tekninen riskiarvio tai rakennuksen elinkaariarvio edellyttäisivät.

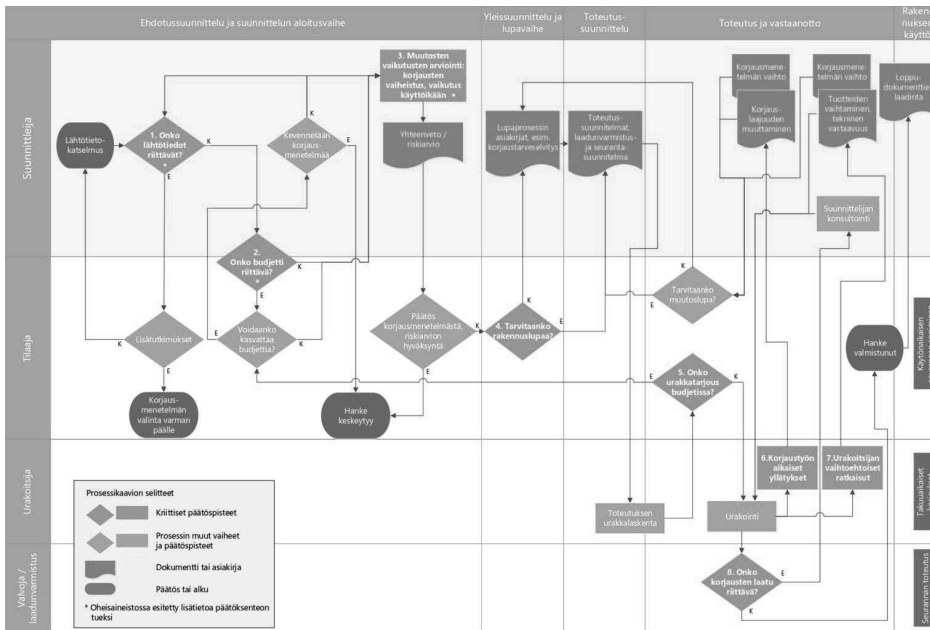
4. Korjausmenetelmän valintaprosessi

Korjaussuunnittelija joutuu korjaussuunnitteluprosessin aikana tekemään useita erilaisia päätöksiä, jotka lopulta johtavat lopulliseen korjausmenetelmän valintaan sekä lopullisten suunnitelmadokumenttien laadintaan. Tämän tutkimuksen yhteydessä laaditussa prosessikaaviossa kuvataan hankkeen kulku korjaussuunnittelun aloitusvaiheesta käyttöönottoon. Kaavio on laadittu rakennesuunnittelun tehtäväluettelon RAK18 [3] mukaisesti. Lisäksi prosessikaaviossa on esitetty hankkeen eri osapuolten tehtävät ja korjaussuunnittelun näkökulmasta **kriittiset päätöspisteet** suunnittelun edetessä. Päätöksissä on huolehdittava, että hankkeen eri osapuolet ovat tekemässä päätöstä riittävin perustein ja päätösten vaikutukset tunnistuen. Lisäksi kaaviossa kuvaillaan, millaisia keskeisiä tuotoksia ja asiakirjoja suunnitteluprosessin eri vaiheissa tulisi syntyä, jotta suunnittelu etenisi johdonmukaisesti kohti korjaustyön toteutusta ja onnistunutta korjaushanketta.

Tutkimuksessa havaittiin kahdeksan kriittistä korjaustavan valintaan liittyvää vaihetta eli niin sanottua päätöspistettä, jotka merkittävästi vaikuttavat korjaussuunnittelun kannalta korjaushankkeen kulkuun ja toteutettavaan korjausmenetelmään. Kriittiset vaiheet ovat

1. Lähtötietojen riittävyyden arviointi (ehdotussuunnittelu)
2. Budjetin riittävyyden arviointi tarvittaviin korjauksiin nähden (ehdotussuunnittelu)
3. Muutosten vaikutusten arviointi eli korjausten vaiheistustarve ja muutosten vaikutus käyttökäyttöön (ehdotussuunnittelu)
4. Rakennusluvan tarve (yleissuunnittelu)
5. Urakkatarjouksen budjetinmukaisuus (korjaustyön toteutus)
6. Korjaustyön aikaisten yllätysten vaikutus (korjaustyön toteutus)
7. Urakoitsijan vaihtoehtoiset korjausratkaisut (korjaustyön toteutus)
8. Korjaustyön laatutarkastelu (korjaustyön toteutus).

Korjausmenetelmän valinnan prosessikaavio on esitetty kuvassa 1 ja prosessikaavio on esitetty kokonaisuudessaan Korjausmenetelmän valinta kosteusvaurioituneessa rakennuksessa -diplomityössä [8].



Kuva 1. Korjausmenetelmän valintaprosessi korjaussuunnittelijan näkökulmasta

Prosessikaavion vaiheet 1–3 liittyvät korjaussuunnittelussa alustavasti käytettävään korjausmenetelmän valintaan, sillä näissä vaiheissa kartoitetaan korjausten teknistä korjaustarvetta suhteessa muihin korjaushankkeeseen vaikuttaviin tekijöihin ja vertaillaan vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä keskenään. Muut kriittiset vaiheet ovat sellaisia, joissa ehdotussuunnitteluvaiheessa käytettäväksi päätetty korjausmenetelmä voidaan joutua päivittämään tai muuttamaan esiin tulleiden tekijöiden vuoksi, kuten urakoitsijan vaihtoehtoisten ratkaisujen, lisätietojen tai laadunvarmistuksessa selvinneiden syiden takia.

Prosessikaaviosta voidaan havaita, että päätös korjausmenetelmän valinnasta tehdään heti korjaussuunnittelun alkuvaiheessa. Mitä pidemmälle hanke etenee, sitä enemmän korjausmenetelmään liittyvät muutokset vaikuttavat korjausten aikatauluun ja kustannuksiin. Hankkeen onnistumisen kannalta onkin tärkeää, että korjaussuunnittelijalla on keinoja varmistaa nimenomaan hankkeen alkuvaiheessa tehtävän päätöksenteon onnistuminen sekä keinoja arvioida valittua korjaustapaa hankkeen edetessä yhteistyössä hankkeen muiden osapuolten kanssa.

5. Haasteet korjausmenetelmän valintaprosessissa

Tutkimuksen perusteella tunnistettiin selkeitä korjausmenetelmän valintaprosessiin liittyviä haasteita. Valintaprosessin haasteiden havaittiin olevan yleisesti hankkeen eri osapuolten tiedossa, sillä sekä korjaussuunnittelijat että tilaajat ja urakoitsijat nostivat esille samantyyllisiä epäkohtia.

Hankkeen lähtökohtien osalta haasteita koetaan erityisesti rakenteiden vaurioiden ja tilaajan toiveiden ja tavoitteiden, kuten aikataulun, budjetin, tilojen korjaustyön aikaisen käytön ja tilaajan tahtotilan yhteensovittamisessa sekä lähtötietojen saatavuudessa. Kiinteistöistä ei välttämättä ole laadittu pitkän tähtäimen suunnitelmaa tai korjausta varten kunnollista hankesuunnitelmaa, minkä vuoksi lähtökohdat korjauksille voivat olla hyvinkin epäselvät hankkeen eri osapuolille. Lisäksi hankesuunnitelman sisältämän kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen laatu vaihtelee. Kuntotutkimukset ovat usein paikallisia arvioita rakenteiden

kunnosta, eikä kuntotutkimuksia usein tehdä suunnittelua ajatellen. Ilman kunnollista hankesuunnitelmaa ja siihen sisältyvää kosteus- ja sisäilmateknistä kuntotutkimusta ei välttämättä pystytä tunnistamaan oikeita korjausmenetelmiä, jolloin myös hankkeen budjetti ja aikataulutus on saatettu laatia virheellisesti.

Tutkimuksen perusteella haasteellisuus vanhojen suunnitelmien saatavuudessa on muodostunut käytännön tasolla ongelmaksi. Erityisesti hyvin vanhassa rakennuskannassa suunnittelussa hyödynnettäviä, nykytilaa vastaavia suunnitelmia on vähän saatavilla. Toisaalta kohteista on valtava määrä erilaisia toteutuneita ja toteutumattomia muutos- ja osasuunnitelmia, joiden sekaan käyttökelpoisimmat asiakirjat hukkuvat. Lisäksi suunnitelmia saattaa olla pirstaleisesti erinäisissä järjestelmissä ja arkistoissa. Suunnitelmien etsiminen voikin pahimmillaan viedä merkittävästi resursseja itse suunnitteluun käytettävästä ajasta, jos se jää suunnittelijan vastuulle. Tämä lähtötietojen pirstaleisuus ja saatavuusongelmat hankaloittavat tiedon siirtymistä tilaajalta suunnittelijalle, ja näin ollen rakenteista ei välttämättä pystytä muodostamaan läheskään täysin paikkaansa pitävää kuvaa korjaussuunnittelua varten.

Korjaushankkeen lähtökohtien lisäksi haasteita havaittiin korjausten teknisessä toteutuksessa. Haasteet liittyvät erityisesti korjausten laadunvarmistukseen ja korjausten onnistumisen seurantaan. Tutkimuksessa havaittiin, että laadunvarmistustoimenpiteiden ja korjausten onnistumisen seurannan tärkeyttä ei vielä täysin ymmärretä, minkä takia niiden suunnitteluun ja toteuttamiseen ei usein panosteta riittävästi. Korjaussuunnittelijoiden kokemuksen mukaan korjausten seurantasuunnitelma laaditaan hyvin harvoin. Myös suunnitelmien laadunvalvonnassa havaittiin puutteita, eikä tilaaja ja urakoitsija välttämättä useinkaan osallistu suunnitelmien laadunvalvontaan, vaikka laadunvalvonta maankäyttö- ja rakennuslain [9] mukaan kuuluu suunnittelijoiden lisäksi myös hankkeen muille osapuolille.

Yhtenä isona haasteena korjausmenetelmän valintaprosessissa voidaan nähdä vähäinen yhteistyö ja yhteydenpito eri sidosryhmien kanssa. Korjaussuunnittelijoiden käytännön kokemuksen mukaan korjaussuunnittelijat ovat harvoin yhteydessä kuntotutkijoiden kanssa, etenkin silloin, jos suunnittelija ja kuntotutkija eivät ole samasta yrityksestä. Tampereen yliopiston BeKo-hankkeen [6] mukaan korjausmenetelmäksi valitaan usein juuri kuntotutkimuksessa esitetty toimintatapa. Tämän takia yhteistyö olisi tärkeää, jotta kaikki oleellinen tieto kuntotutkimusten yhteydessä tehdyistä havainnoista siirtyisi myös korjaussuunnitteluun. Suunnittelijan olisi myös tärkeä osata kyseenalaistaa tutkimuksessa esitetyt korjaustavat, etenkin jos tutkimuksesta on jo pidempi aika. Myös yhteistyö tilaajan ja urakoitsijan suuntaan vaihtelee. Korjaussuunnittelijoiden yhteydenpito erityisesti urakoitsijan usein katkeaa suunnitelmien toimittamisen jälkeen, jolloin esimerkiksi korjausten laadunvarmistustoimenpiteistä ja näin ollen korjausten onnistumisesta ei saada palautetta.

6. Oikeasta korjaustavan valinnasta onnistuneisiin korjauksiin

Oikealla korjausmenetelmän valinnalla voidaan pitkälti taata onnistunut korjaushanke. Onnistunut korjaushanke on kuitenkin prosessikaaviossa esitetyn tavoitin seurausta oikean korjausmenetelmän valinnan lisäksi eri osapuolten välisestä yhteistyöstä sekä selkeistä vastuunjaosta. Jotta korjausprosessi onnistuisi, vaaditaan hankkeelta ainakin seuraavat avaintekijät:

- korjaussuunnittelijan, kuntotutkijan, tilaajan, urakoitsijan sekä valvojan ammattitaito ja kokemus
- selkeät vastuunjaot
- eri sidosryhmien välinen aktiivinen yhteydenpito ja yhteistyö

- aktiivinen projektijohtaminen ja hankkeen sujuva eteneminen
- suunnitteluun varattujen resurssien riittävyys
- riittävät lähtötiedot
- tavoitteiden mukainen korjausmenetelmän valinta
- riittävän yksityiskohtaiset ja toteutuskelpoiset suunnitelmat
- laadunvarmistustoimenpiteillä varmennetut työsuoritteet

Korjaushankkeessa avaintekijöiden toteutumisella pystytään korjausmenetelmän valintaa luotettavasti arvioimaan hankkeen edetessä niin, että suurilta budjetin ylityksiltä välttyttäisiin ja lopputuloksena olisi onnistunut korjaushanke.

7. Yhteenveto

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että korjaushanke on monimuotoinen prosessi, jonka avainasemassa ovat korjaussuunnittelun onnistuminen ja erityisesti tavoitteiden mukainen korjaustavan valinta. Korjaussuunnitteluprosessin alussa tehtyä korjaustavan valintaa on tärkeää kuitenkin arvioida hankkeen edetessä yhteistyössä hankkeen eri osapuolten kanssa, jotta lopputuloksena olisi onnistunut korjaushanke.

Tutkimuksen perusteella korjaussuunnitteluprosessissa on havaittu haasteita, jotka myös ovat hankkeen eri osapuolten tiedossa. Erityisesti eri sidosryhmien välinen yhteistyö, pitkäntähtäimen suunnitelmallisuuden puute, laadunvarmistuksen suunnittelu ja sen toteutuminen sekä käytönaikainen seurantasuunnitelma ovat osatekijöitä, joissa edelleen havaitaan toistuvia puutteita korjaushankkeissa. Panostamalla näihin osatekijöihin, voidaan lisätä eri osapuolten panostusta korjaushankkeen onnistuneeseen läpivientiin ja näin ollen saada osatekijät osaksi kaikkia korjaushankkeita.

Lähdeluettelo

- [1] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (2017). ROTI 2017 - Rakennetun omaisuuden tila. Helsinki. 84 s.
- [2] Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Vornanen-Winqvist, C., Annala, P. (2019). Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriö. Helsinki. 101 s. + liitt. 179 s.
- [3] RT 103087. (2019). Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK18. Rakennustietosäätiö RTS. 19 s.
- [4] Asikainen, V. (toim.) ja Peltola, S. (toim.). (2008). Sisäilmaongelman koulurakennuksen korjaaminen. Osat 1 ja 2. Opetushallitus. Vammala. 247 s.
- [5] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (2020). RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. 324 s. + liitt. 6 s.
- [6] Suomen Betoniyhdistys ry. (2016). By41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016. Suomen betoniyhdistys ry / BY-Koulutus Oy. 120 s.
- [7] Lahdensivu, J., Varjonen S., Köliö, A. (2010). Betonijulkisivujen korjausstrategiat, tutkimusraportti 148, BeKo-hanke. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. 82 s.
- [8] Hakanen, J. (2020). Korjausmenetelmän valinta kosteusvaurioituneessa rakennuksessa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. 102 s. + liitt. 22 s.
- [9] MRL 132/1999. Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Annettu Helsingissä 5 päivänä helmikuuta 1999. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990132>.

Koulurakennusten sisäilmaston tyypilliset korjaustavat -hanke

Inari Weijo, Timo Turunen ja Jukka Lahdensivu
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Kesäkuussa 2021 alkaneessa projektissa Ramboll selvittää ympäristöministeriön toimeksiannosta tyypillisten suomalaisten yleissivistävien oppilaitosrakennusten sisäilman laatuun vaikuttavia yleisimpiä vaurioita ja niiden korjaustapoja. Projektin tavoitteena on luoda aineisto, jonka pohjalta laaditaan havainnollistava verkkosivusto, kuten aiemmin on toteutettu Hometalkoot-hankkeessa. Tavoitteena on saada visualisoitua valikoituja, tyypillisiä oppilaitosrakennuksia siten, että niistä erottuvat niille tyypilliset rakenteet ja talotekniset järjestelmät ja esittää niissä esiintyvien tyypillisten vaurioiden ja puutteiden vaikutus sisäilman laatuun. Aineisto linkitetään soveltuvilta osin ympäristöministeriön julkaisemaan Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -oppaaseen ja sen detaljitason ohjeistukseen eritasoisten korjaustapojen valinnassa ja arvioinnissa. Visualisoinnin lisäksi tuleva sivusto edesauttaa jo laadittujen ohjeiden ja materiaalien käyttöä ja tuo ne lähemmäs tiedonhakijaa. Nyt laadittava materiaali on ensimmäinen osavaihe projektissa, jonka verkkosivustojen tavoitteena on valmistua vuonna 2022. Hanke toteutetaan osana Terveet tilat 2028 -toimenpideohjelmaa ja sen ohjauksesta vastaa ympäristöministeriön yli-insinööri Timo Lahti.

1. Taustaa koulurakentamisesta Suomessa

1.1 Koulurakentamisen historiaa

Suomalaisen koulurakentamisen historia alkaa jo 1800-luvulta. Kansakouluasetus on tullut voimana vuonna 1866, ja 1870-luvun jälkeen on alettu rakentamaan niin maaseudulla kuin kaupungeissa erillisiä koulurakennuksia. Isoissa kaupungeissa koulut annettiin arkkitehtien suunniteltavaksi ja kouluja rakennettiin siten yksilöllisemmin, mutta pienemmille paikkakunnille on ollut jo 1800-luvulta lähtien käytössä tyyppi- tai mallipiirustuksia. Piirustuksia on uudistettu eri vuosikymmeninä. 1900-luvulla suunnittelua alettiin kilpailuttaa yleisemmin, mutta mm. vielä 1940-luvulla jälleenrakennuksen aikaan rakennettiin paljon pieniä puisia tyyppikouluja. [1]

Arkkitehtuurimuseon keräämä sivusto [1] jakaa koulurakentamisen vuosikymmenet viiteen eri aikakausiosioon sen perusteella, miten yhteiskunnalliset tapahtumat, pedagogiset uudistukset ja tyylisuuntaukset ovat vaikuttaneet rakentamiseen. Näiden syiden vuoksi myös rakennuksen arkkitehtuuri sekä rakentamistapa ovat muuttuneet samoissa sykleissä, vaikuttaen nyt niiden tyypillisiin korjaustapoihin. Em. sivustolla koulurakentamisen vuosikymmeniä tarkastellaan seuraavissa osissa:

- 1800-luvun loppu ja 1900-luvun ensimmäinen vuosikymmen
- 1910- ja 1920-luvut
- 1930- ja 1940-luvut
- 1950- ja 1960-luvut
- 1970-luku

Merkittävimpiä opetusrakennustarpeeseen vaikuttavia muutoksia olivat kansakouluasetuksen lisäksi mm. vuonna 1921 voimaan astunut oppivelvollisuus, 1920-luvulla asteittain alkanut

kouluruokailu sekä 1940-luvulla sotien jälkeinen väestöliike ja pikainen tarve uusille koulurakennuksille aikana, jolloin vallitsi yleinen materiaali-pula. Jokaisella vuosikymmenellä koulutoiminnan pedagogiset muutokset ovat aiheuttaneet tilojen järjestelyihin ja sijoitteluun muutoksia, jotka vaikuttavat merkittävästi myös rakennustapaan. Luokkahuoneiden lisäksi alettiin käyttämään suurempia kokoontumistiloja, erillisiä liikuntasaleja ja nk. maisemaluokkia siirreltävine seinineen. Näiden tilojen sijoittelu perinteisiin luokkahuoneisiin nähden vaihteli eri vuosikymmeninä ja vaikutti siten myös rakennuksen muotoon ja kerrosmääriin.

Rakennukset jaotellaan niiden rakenteiden ja rakennustavan mukaan nyt alkaneessa projektissa hyvin samankaltaisesti kuin lähteessä [1]. Aikakausiin vaikuttavat merkittävästi yleinen rakentamisen tyylisuuntaus sekä saatavilla olevat ja kulloinkin suosittu rakennusmateriaalit. Historiaa käsittelevään aineistoon ei ole otettu huomioon 1970-lukua nuorempaa rakennuskantaa, joka sekin on jo erilaisten korjausten tarpeessa.

1.2 Koulurakennuskanta tilastollisesti

Terveet tilat 2028 -hankkeessa laaditun Yleissivistävien oppilaitosrakennusten nykytilaselvityksessä [2] on esitelty yleissivistävän koulutuksen koulurakennuskantaa ja sen suunnittelua. Sen mukaan Suomessa on vuoden 2018 loppuun mennessä valmistunut 2812 yleissivistävää oppilaitosrakennusta. Näitä ovat tutkimuksessa olleet peruskoulut ja lukiot sekä yleissivistävät vammais- tai muut erityiskoulut. Tämän tilaston näkökulmasta tyypillisiä suomalaisia koulurakennuksia ovat erityisesti 1950-1960-lukulaiset rakennukset (36 %) sekä yli 100 vuotta vanhat, 1800- ja 1900-luvun vaihteessa rakennetut rakennukset. Näihin vuosiin sijoittuvatkin em. asetukset oikeudesta ilmaiseen opetukseen sekä myöhemmin oppivelvollisuuteen kuin myös sodan jälkeiset jälleenrakennusvuodet. [1] Näinä ajanjaksoina rakennetut koulurakennukset edustavat määrällisesti yli puolta koko em. koulurakennuskannasta. Koulurakennuksia on kuitenkin rakennettu melko tasaisesti myös muina vuosikymmeninä (kuva 1). 2000-luvulla vauhti on ollut noin 26 koulurakennusta/vuosi, kiihtyen 2010-luvulla. 1950-1960-luvulla rakennuksia valmistui keskimäärin noin kaksi kertaa enemmän kuin muina vuosikymmeninä, mutta muutoin tahti on ollut pääpiirteissään nykyisen kaltaista, 1990-luvun lamavuosia lukuun ottamatta.



Kuva 1. Suomen yleissivistävien koulutuksen koulurakennuskanta valmistumisvuoden mukaan (Tilastokeskus 2019).

Saman selvityksen yhteydessä selvitettiin ammatillisen koulutuksen rakennuksia. Näitä oli vuoden 2019 lopussa Suomessa 1096 kpl. Näistä määrällisesti eniten on rakennettu 1980-luvulla, mutta laajuudeltaan eniten sekä 1980-luvulla että 1960-luvulla.

Selvityksen mukaan suurin osa (57 %) yleissivistävästä koulurakennuskannasta on varmuudella paikalla rakennettuja rakennuksia. Oletettavasti rakennukset, joiden rakennustapaa ei ole tilastoitu (20 %), on rakennettu ennen vuotta 1924 ja edustavat nekin todennäköisesti paikalla rakentamista. [2] Tämän perusteella voidaan todeta, että paikalla rakennettava runko materiaalista riippumatta on selvästi yleisin koulujen rakentamistapa. Selvityksessä ei ole yksilöity koko rakennuskannan rakennusmateriaaleja, joten ei ole dataa siitä, miten paikalla rakentaminen jakautuu tilastollisesti runkorakenteen rakennusmateriaalien (puu, betoni, tiili) välillä.

1.3 Kouluihin liittyvän korjausrakentamisen historiaa

1990-luvulla on erityisesti noussut esiin koulurakennusten sekä erilaisten päiväkotien ja muiden oleskelutilojen sisäilmaan liitetyt ongelmat. Tuolloin alettiin puhua kosteus- ja homevaurioista ja niiden syitä ja seurauksia tutkittiin. Julkisuuteen nousivat termit ”homekoulu” ja ”sisäilmaongelma”. 1990-luvulla valmistui erilaisia julkisia ohjeita ongelmien korjaamiseksi, kuten ympäristöministeriön kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus -ohje vuonna 1997 [3] sekä samana vuonna julkaistu kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus -ohje [4]. 2000-luvulla on valmistunut erityisesti myös koulu- ja oppilaitosrakennuksia varten erillisiä ohjeita, kuten Kansanterveyslaitoksen julkaisema Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot vuodelta 2007 [5] sekä opetushallituksen Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen (osat 1 ja 2) vuodelta 2008 [6]. Erityiseen rakennustyyppiin kohdistuvien ohjeiden julkaiseminen ilmentää näissä rakennuksissa esiintyvien ongelmien yleisyyttä ja haasteita niiden kuntoon saattamisessa. Ohjeita on laadittu sekä tilaajille, kuntotutkijoille että suunnittelijoille.

2010- ja 2020-luvulla korjausrakentamisessa on yleisesti tapahtunut sekä asetusten näkökulmasta että prosessien ja rakentamisen ratkaisujen näkökulmasta merkittäviä edistysaskeleita säännöstellymmän ja laadukkaamman rakentamisen puolesta. Viranomaisohjeistuksia on päivitetty, osapuolten ja erityisesti konsulttien osaamiseen ja pätevyyteen on esitetty konkreettisia vaatimuksia ja kehitetty ratkaisuja ja järjestelmiä, joilla saavutetaan parempia ja varmistettuja lopputuloksia. Esimerkiksi edellä mainitut ympäristöministeriön tutkimus- ja suunnitteluohjeet on kirjoitettu kokonaan uudelleen kuntotutkimusten osalta vuonna 2016 ja korjausrakentamisen ohjeistuksen osalta vuonna 2019 [7]. Vuonna 2015 voimaan tulleessa valtioneuvoston asetuksessa rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määräytymisestä (VN 214/2015) on ensimmäistä kertaa tunnistettu erillinen korjausrakentamiseen liittyvä suunnittelutehtävä, *kosteusvaurion korjaustyön suunnittelija*, jolle on esitetty pätevyysvaatimuksia. Siten korjausrakentaminen on noussut uudisrakentamisen rinnalle vaativaa osaamista edellyttävänä tehtävänä. Tilastollisesti korjausrakentaminen on ollut jo pitkään uudisrakentamista vastaavaa siihen käytettyjen eurojen näkökulmasta. Esimerkiksi vuonna 2020 Rakennusteollisuus raportoi uudisrakentamiseen käytetyn 15,0 mrd. € ja korjausrakentamiseen 14,0 mrd. €. [8]

2. Hankkeen tavoitteet

Hankkeessa tarkastellaan tyypillisten suomalaisten koulurakennusten sisäilmaan liittyviä yleisimpiä vaurioita ja niiden korjaustapoja. Projektin tavoitteena on luoda aineisto, jonka pohjalta laaditaan samantyyppinen havainnollistava verkkosivusto kuin Hometalkoot-hankkeessa on laadittu.

Hankkeessa esitellään tyypillisiä eri vuosikymmenillä rakennettuja suomalaisia oppilaitosrakennuksia, joissa esiintyy korjausta edellyttäviä, sisäilman laatua heikentäviä

vaurioita. Projektin asiantuntijoiden kokemukseen sekä edellä mainittuihin selvityksiin perustuen käsiteltäväksi on valittu seuraavia rakennustyyppiejä:

1. 1900-luvun vaihteen massiivitiilirunkoiset rakennukset
2. 1900-luvun vaihteen hirsirunkoiset rakennukset
3. 1920- ja 1930-luvun betoni- ja tiilirunkoiset rakennukset
4. 1950-1960-lukulaiset, paikalla valetut betonirakennukset
5. 1970-1980-lukujen betonielementtirakenteiset rakennukset
6. 1990-2000-lukujen monimuotoiset ja rakenteeltaan vaihtelevat koulurakennukset

Tavoitteena on kuvata näissä rakennuksissa yleisimmin esiintyvät rakenteet sekä talotekniikkajärjestelmät ja niiden vaikutus oppilaitosrakennuksissa esiintyviin, korjausta vaativiin sisäilma-altisteisiin. Sivusto luo linkin ympäristöministeriön julkaisemaan Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -oppaaseen ja sen detaljitason ohjeistukseen eritasoisten korjaustapojen valinnassa ja arvioinnissa. Siten tarkoituksena on luoda sivusto, joka visualisoinnin lisäksi helpottaa jo laadittujen ohjeiden ja materiaalien käyttöä. Sivuston kohderyhmänä ovat sekä maallikot että korjausrakentamisen ammattilaiset. Näille jälkimmäisille sivusto toimii linkityksen kautta tukena oman työn ohjauksessa ja edesauttaa aiemmin julkaistun korjausoppaan tehokasta käyttöä. Sivustolla tavoitellaan ymmärryksen lisäämistä eri rakennusten tyypillisimmistä ominaispiirteistä ja visualisoinnin avulla auttaa hahmottamaan nopeammin kriittiset rakenteet ja taloteknisen järjestelmän osat. Sivusto antaa sekä käyttäjille, päättäjille että rakennusalan ammattilaisille käsityksen kokonaisuudesta, kun oppilaitosrakennuksen korjaamista valmistellaan.

2.1 Hankkeen eteneminen

Hanke on alkanut kesäkuussa 2021 ja se jakaantuu kolmeen eri vaiheeseen. Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa kerätään lähtötietoaineisto sekä kootaan esitettävän aineiston sisältö ja esitysmuodon luonnokset ja ehdotukset. Vaiheen on tarkoitus olla valmis syksyn 2021 aikana ja koko hankkeen vuoden 2022 aikana. Hanke toteutetaan osana Terveet tilat 2028 – toimenpideohjelmaa ja sen ohjauksesta vastaa ympäristöministeriön yli-insinööri Timo Lahti.

2.2 Oppilaitosrakennusten sisäilma-altisteet

Tampereen teknillisessä yliopistossa vuonna 2019 päättyneessä Combi-tutkimushankkeessa tutkittiin palvelurakennuksien alttiutta kosteus- ja mikrobivaurioille. Yksi tutkimuksen tuloksista käsitteli tilastollisesti tarkasteltavana olleiden kuntien ja kaupunkien palvelurakennuksien kuntotutkimusraportteja ja niissä havaittuja tyypillisiä vaurioita eri rakennusosissa. [9]

Tutkimuksissa voitiin havaita, että

- rakennusvuodesta riippumatta erityisesti maanvastaisissa rakenteissa esiintyy korjausta edellyttäviä vaurioita (75-96 % tapauksista). Ryömintätilaisissa alapohjarakenteissa korjaustarve on yleisesti vähäisempi, luokkaa 33-56 %
- ulkoseinärakenteiden korjaustarve vaihtelee runkotyypeittäin ja vuosikymmenittäin. Yleisesti ottaen ulkoseinärakenteiden korjaustarve on 50 %:n luokkaa, vaihdellen 20-86 %:n välillä. Selvästi eniten aineistossa on ollut rakennuksia, joissa on esiintynyt maanvastaisia ulkoseiniä sekä betonirunkoisia rakennuksia, joissa todennäköisesti on hyvin vaihtelevat julkisivurakenteet.
- Yläpohjarakenteissa korjaustarve on yleisesti vähäisempi muihin rakennusosiin verrattuna, luokkaa 14-48 %:n välillä.

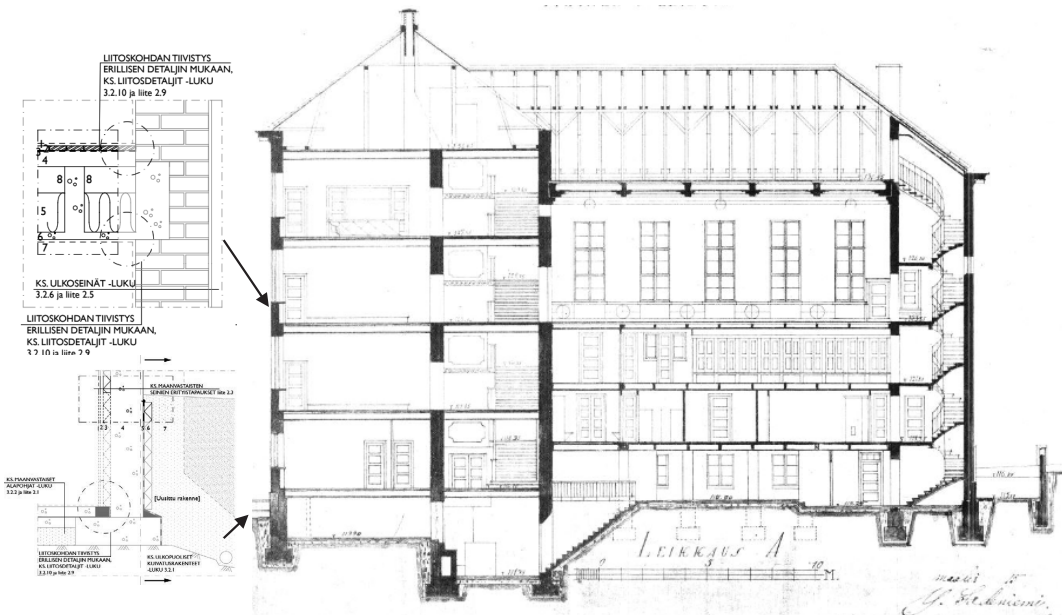
Tutkimushankkeen johtopäätös oli myös, että rakennukset ovat moniongelmaisia ja korjattavaa löytyi useasta rakennusosasta, mutta vauriot ovat luonteeltaan enemmän pistemäisiä kuin laaja-alaisia. Lisäksi todettiin, että mitä vanhempi rakennus on, sitä enemmän keskimääräisesti löytyi kosteus- ja mikrobivaurioihin liittyvää korjaustarvetta. [9]

2.3 Oppilaitosrakennusten käsittelytapa

Jokainen rakennustyyppi tullaan esittämään kokonaisen rakennuksen leikkauksena, jossa esitetään rakennuksen keskeiset rakennusosat sekä ne talotekniset järjestelmät, joilla on vaikutusta rakennuksen sisäilmaan. Kuvassa 2 on esitetty luonnos esitystavasta, jossa rakenteet näkyvät poikkileikkauksessa ja niistä on esitetty tyypillinen korjaustapa Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -oppaan mukaisesti. [7]

Luonnokseen tullaan lisäämään vastaavat viittaukset kaikkiin keskeisiin rakennusosiin, kuten ala-, väli- ja yläpohjat, ulkoseinät ja vesikatot ja muut olennaiset rakennusosat, kuten putkitunnelit tai märkätilat. Lisäksi esitetään tekstein tyypilliset sisäilma-altisteet, kuten kosteusvauriot, muut vaurionaiheuttajat, haitta-aineet ja talotekniikan puutteet tai vauriot.

Syksyn 2021 aikana laaditaan yksityiskohtaisempi luonnosesitys jokaisesta kuudesta rakennustyypistä, luetteloidaan niiden tyypilliset sisäilma-altisteet sekä linkitetään ne em. korjausohjeeseen. Tämä lähtöaineisto toimii vaiheen 2 lähtötietoaineistona, jossa luodaan lopullinen visuaalinen esitysmuoto yksityiskohtineen 3D-toteutusta varten.



Kuva 2. Ote periaatteellisesta luonnoksesta lähtötietomateriaaliksi verkkosivujen visuaalisen ilmeen rakentamiseksi rakennustyypistä 1, 1800-luvun massiivitiilirunkoiset oppilaitokset.

3. Yhteenveto

Ympäristöministeriön hankkeessa ”koulurakennusten sisäilmaston tyypilliset korjaustavat” on valittu pääpiirteissään kuusi eri rakennustyyppiä tarkemmin esiteltäväksi tulevilla verkkosivulla. Valitut rakennukset edustavat historiallisesti, tilastollisesti ja teknisten tutkimusten perusteella yleisimpiä suomalaisia oppilaitosrakennuksia. Niitä on korjattu Suomessa viime aikoina runsaasti ja lähivuosina korjaukset jatkuvat. Tulevat verkkosivut linkittävät rakennusten erityispiirteet kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -oppaaseen sekä mahdollisiin muihin aineistoihin ja auttavat sivustojen käyttäjää syventymään oman rakennuksensa erityispiirteisiin sekä löytämään tietoa juuri niistä.

Lähdeluettelo

- [1] Koulurakentamisen historiaa - Arkkitehtuurimuseo -verkkosivut. saatavilla: <https://www.mfa.fi/kokoelmat/tietopaketit/koulurakentamisen-historiaa/> viitattu 3.8.2021
- [2] Oksanen, R., Haapanen, J., Kero, P., Nuta, V., Lahdenkauppi, L., Korma, M. 2020. Yleissivistävien oppilaitosrakennusten nykytilaselvitys P39738. opetushallitus. 134 s. saatavilla: <https://www.oph.fi/fi/tilastot-ja-julkaisut/julkaisut/terveet-tilat-2028-yleissivistavien-oppilaitosrakennusten>. viitattu 4.8.2021
- [3] Ympäristöministeriö, Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus, 1997. 80 s.
- [4] Ympäristöministeriö, Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus 1997
- [5] Meklin T., Putus T., Hyvärinen A., Haverinen-Shaughnessy U., Lignell U., Nevalainen A. 2007. Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot Opas ongelmien selvittämiseen. Kansanterveyslaitos 41 s.
- [6] Asikainen V., Peltola S. Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen (osat 1 ja 2) 2008, opetushallitus, 248 s.
- [7] Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C., Annila, P. 2019. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Helsinki. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. 284 s.
- [8] Rakennusteollisuus ry. 2021. Rakennustuotannon arvo vuonna 2020. Tilastot ja suhdanteet-verkkosivut. saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/Kuviopankki/>. viitattu 4.8.2021
- [9] Annila, P.J., Hellemaa, M., Pakkala, T.A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M. 2017. Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. Case Studies in Construction Materials. Vol. 6. Pp. 103-108.

Tiivistää vai kengittää?

Olli Teriö¹, Ilkka Räinen¹, Ulla Haverinen-Shaughnessy², Santeri Shroderius², Pentti Kuurola², Timo Kauppinen³ ja Mikko Salin⁴

¹ Oulun rakennusvalvonta

² Oulun yliopisto

³ Tmi Mutsal

⁴ Isec Oy

Tiivistelmä

Rivi- ja pientalojen suunnittelussa 1970–90 luvuilla suosittiin valesokkelirakenteita, joka noudatti sen aikaisia määräyksiä ja ohjeita. Valesokkelirakenteella voitiin saavuttaa joitakin etuja lämpötekniisessä mielessä, mutta rakenteiden kosteusteknisistä toimivuutta tai niihin liittyviä riskejä ei osattu vielä kaikilta osin arvioida. Muutaman vuosikymmenen jälkeen on havahduttu useissa taloyhtiöissä epäilemään rakenteisiin liittyviä kosteus- ja mikrobivaurioita. Valesokkelin korjaaminen nykyäskäytöksen mukaan riskittömäksi on aikaa vievää, työlästä ja kallista. Suositeltavana korjaustapana on vaurioituneiden rakenteiden poistaminen ja rakenteen korvaaminen se uudella kosteusteknisesti riskittömämmällä rakenteella eli kengittämällä. On huomattava, että kaikki valesokkelirakenteet eivät ole vaurioituneet. Tässä paperissa esitetään kosteusvaurioiden korjauksiin liittyviä haasteita sekä kokonaisvaltainen lähestymistapa kosteusvauriokorjausten ja niihin liittyvien sisäilmakorjausten toteutusvaihtoehtojen arvioinnin ja valinnan kehittämiseksi. Paperissa tarkastellaan myös taloyhtiön/kiinteistöjen kunnossapitostrategiaa ja kunnossapidon pitkän tähtäimen suunnitelmaa. Lisäksi tarkastellaan valesokkelirakenteisiin liittyviä jatkotutkimustarpeita.

1. Johdanto

Rivi- ja pientalojen suunnittelussa 1970–1990 luvuilla suosittiin valesokkeliratkaisua (Kuva 1), jolloin lattiapinta saatiin mahdollisimman lähelle pihan tasoa eikä sisälle tullessa tarvinnut nousta portaita [1]. Samaan aikaan alettiin panostamaan öljykriisin vuoksi myös energiatehokkuuteen.



Kuva 1. Esimerkki valesokkelirakenteesta ennen kengitystä.

Valesokkelirakenteilla voitiin saavuttaa joitakin etuja lämpötekniisessä mielessä, mutta rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta tai niihin liittyviä riskejä ei osattu vielä kaikilta osin arvioida. Omana aikakautenaan valesokkelia pidettiin hyvänä rakennustapana [2]. Muutaman vuosikymmenen jälkeen on havahduttu useissa taloyhtiöissä epäilemään rakenteisiin liittyviä kosteus- ja mikrobivaurioita. Esimerkiksi Oulun rakennusvalvontaan saapuu kengitysten lupahakemuksia keskimäärin viikoittain.

Valesokkelin korjaaminen nykyäsityksen mukaan riskittömäksi on aikaa vievää, työlästä ja kallista [3]. Yleisesti suositeltavana korjaustapana pidetään vaurioituneiden rakenteiden poistamista ja rakenteen korvaamista uudella kosteusteknisesti riskittömämmällä rakenteella eli kengittämällä [1]. Harvoin mahdollinen terveyshaitta pyritään estämään edullisemmalla tiivistyskorjauksella. Ellei asunnon sijainti ole erityisen hyvä, saattaa valesokkelin korjaus tulla jopa kalliimmaksi kuin mitä asunnon mahdollinen myyntiarvo on. Korjaukset, jotka eivät ole kustannustehokkaita, ovat myös kansantaloudellinen rasite. Suomessa käytetään arviolta kymmeniä miljoonia euroja vuosittain valesokkeleiden kengityksiin. Maksajina ovat usein ikääntyvät 70–80 luvun asunnoissa asuvat henkilöt. Valesokkelirakennuksiin liittyviä taloudellisia haasteita ovat

- kengityskorjauksen kustannus tyypillisesti yli 1000 €/jm
- kengityksen hinta on samaa suuruusluokkaa uuden ulkoseinän kanssa
- korjauskustannukset voivat olla suuremmat kuin rakennuksen arvonnousu
- uudelleen rakentamisen vaihtoehtoa ei harkita / lasketa
- rakennuksen vakuusarvo ei riitä lainansaantiin
- tieto kosteusvauriosta laskee myyntihintoja.

Vaurion esiinnyttyä sitä ei pitäisi vähätellä – ei myöskään ylireagoida. Tässä paperissa esitetään kosteusvaurioiden korjauksiin johtaneita syitä, haasteita sekä kokonaisvaltainen lähestymistapa kosteusvauriokorjausten läpiviintiin. Kokonaisvaltaista lähestymistapaa tarvitaan, koska kosteus- ja mikrobivauriot ovat yleisiä [4], niiden syyt ovat monitahoisia ja korjausten rahoitus on vaikeutunut. Lisäksi tarkastellaan valesokkelirakenteisiin liittyviä jatkotutkimustarpeita. Paperin sisältö perustuu pääosin kirjoittajien omakohtaisiin kokemuksiin.

2. Valesokkelirakenteiden ja niiden korjaussuunnittelun haasteita

Valesokkeli sisältää suunnitteluratkaisuna kosteus- lämpötekniisiä riskejä, joiden seurauksena erityisesti alajuoksupuun ja seinän alaosien kosteus voi kohota mikrobikasvulle otolliseksi. Tällöin ulkoseinän puu ja eristemateriaalit toimivat mikrobien kasvualustana. Valesokkeleihin liittyviä merkittävimpiä riskien aiheuttajia ja teknisiä haasteita ovat

- ulkoseinän alaosat ovat maanpinnan tasolla tai jopa sen alapuolella
- rakennuksen vierustalla on suuri ulkopuolelta tuleva kosteusrasitus
- alapohjasta tai sokkelirakenteesta puuttuvat kapillaarikatkot
- sokkelin ja ulkoseinät tuuletus on puutteellinen
- lattian ja ulkoseinän tiiveys on puutteellinen
- rakennuksen painesuhteet eivät ole hallinnassa ja korvausilman saanti hallitsematonta
- alapohjassa olevat lämpöputket poistetaan käytöstä.

Usein valesokkeleiden korjaussuunnittelua tehdään puutteellisten lähtötietojen perusteella. Suunnittelun haasteita ovat

- suunnittelijat suunnittelevat varman päälle, jotta vältetään vastuuseen joutumista
- taloyhtiöiden päätöksentekoprosessi, erilaisten osakkaiden erilaiset intressit
- korjausmenetelmän valintaan ei ole ohjeita tai kriteereitä.

Tyypillistä kuntotutkimuksissa on, että tehdään rakenneavaukset ja mittaukset suurimman riskin kohdista kuten syöksytorvien lähetyviltä, joissa näkyy visuaalisestikin kosteuden aiheuttamia poikkeamia. Poikkeamakohdista saadaan tyypillisesti eristeiden mikrobinäytteissä viite tai vahva viite vauriosta. Lähes aina tutkijan johtopäätös on, että muutaman näytteen perusteella suositellaan koko rakennuksen kengityskorjausta. Tällöin kuntotutkimusraporttia lukemalla tulee pääsääntöisesti hyvin negatiivinen kuva kiinteistön kunnosta ja korjauskustannuksista. Selkeä puute on, että valesokkelirakenteen vauriomekanismia ja laajuutta ei ole määritelty kunnollisesti. Vaurioiden syynä ovat usein esimerkiksi seinän vierelle valuvat sade- tai sulamisvedet eikä rakennusfysikaalinen toimivuus. Vaurio rajautuu usein vain muutaman metrin alueelle. Valesokkelin korjaustarve saattaa pienentyä murto-osaan, jos kosteusvaurio ei ole etenevä, syy on poistunut ja rakenne toimii rakennusfysikaalisesti riittävän hyvin. Korjaustapa saattaa tyypistyä tiivistystarpeeksi, kun määritetään

- haitallisten päästölähteiden sijainnit ja vaurioista kertovat hajut
- ilmapuoreitit ja todelliset ilmapuodot sisäilmaan
- koetut oireet ja niiden paikantuminen tilakohtaisesti tai rakenneosakohtaisesti
- vauriota indikoivat kosteusmittaustulokset.

Yllä mainittujen tekijöiden tarkempi analyysi paljastaa valesokkelin korjaussuosituksen usein ylimitoitetuksi tai että varsinainen koettu haitta aiheutuu pääosin muusta kuin valesokkelista. Tällöin riskinä on, että oireilu saattaa korjauksen jälkeen jäädä yhtä suureksi tai jopa suuremmaksi kuin ennen valesokkelin korjausta. Kenttäkokemusten mukaan korjauskustannuksissa on mahdollista säästää yli 80 % säilyttäen samalla rakennus lähes kokonaan käytössä korjausten aikana. Korjausbudjetti on usein mahdollista myös kohdistaa siten, että vaikuttavuus on merkittävästi parempi alkuperäiseen ehdotukseen verrattuna.

3. Ilmapuodot, ilmatiiveys sekä painesuhteiden hallinta ja ilmanvaihto

Oulun rakennusvalvontaa tulee erilaisiin sisäilmaongelmiin kohdistuvia neuvontapuheluita ja viestejä päivittäin. Vain harva näistä neuvonnoista johtaa luvanvaraiseen korjaushankkeeseen. Suurin aktiivisuus neuvontapyyntöissä ajoittuu loppusyksyyn ja kovien pakkasten aikaan. Tyypillisimpiä neuvontojen johtopäätöksiä ovat, ettei rakennuksessa vaihdu ilma varsinaisen ilmanvaihtolaitteiston kautta, vaan ilma tulee sisälle tuntematonta reittiä. Rakennuksen käyttäjä osaa todeta, että rakennuksesta lähtee pois ilmaa ilmanvaihtojärjestelmän tai tulisijojen kautta, mutta tuloilmalle voi olla haastavaa osoittaa selkeää reittiä, mistä poistoilmaa vastaava ilmamäärä rakennukseen tuodaan.

Tuloilman puuttuminen kohdistuu usein painovoimaisen ilmanvaihdon sekä koneellisen poistoilmanvaihdon rakennuksiin, joita rakennettiin 1970–90 luvuilla yleisesti. Talvella myös lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä voi aiheuttaa vastaavia ongelmia, jotka johtuvat lämmöntalteenottokennon sulatusjaksoista. Lisäksi tulisijojen tiheä käyttö talvella usein lisää rakennuksen sisällä alipaineisuutta.

Painovoimainen ja koneellinen poistoilmanvaihto tarvitsevat toimiakseen asianmukaiset korvausilmareitit. Vanhemmassa rakennuskannassa ne ovat yleisesti asianmukaiset, mutta 70-90 luvulla rakennetuissa rakennuksissa vain harvoin. Painovoimaista ilmanvaihtoa on mahdollisesti pyritty tehostamaan lisäämällä järjestelmään poistopuhaltimia, jolloin vastaavasti syntyy suurempia ilmapuotoja rakenteiden läpi, mikäli korvausilmareitit ovat rakentamatta tai ne ovat tukossa. Korvausilman saantia on mahdollisesti pyritty tehostamaan ikkunatiivisteiden katkomisella, mikä on osoittautunut riittämättömäksi.

Rakennuksissa, joissa on koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, alipaineisuus vaihtelee ulkovaipan tiiveydestä riippuen.

Lämmöntalteenotolla varustettujen tulo- ja poistoilmanvaihtolaitteiden lämmöntalteenoton sulanapito on toteutettu termostaattiohjattuna siten, että tuloilmapuhaltimen käyttöä katkotaan jäteilman lämpötilan laskiessa asetteluarvon alapuolelle. Tästä johtuen talvella koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä voi alipaineistaa rakennuksen lämmöntalteenoton sulatusjaksojen aikana. Koneellisen ilmanvaihdon suodattimien likaantumisen todettu joissakin tapauksissa olevan vaikutusta tulo- ja poistoilman ilmavirtatasapainoon ja paine-erojen syntyymiseen rakennuksen ulkovaipan yli [5]. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon mitoituskäytäntö on aikaisemmin ollut mitoitaa poistoilmavirta 10–15% tuloilmaa suuremmaksi, jolloin rakennukseen muodostuu alipaine. Tällä on pyritty välttämään ylipaineista rakennusta ja sisäilman kosteuden kulkeutumista rakenteisiin [5]. Kuinka suureksi mitattava alipaine muodostuu ulkovaipan yli, on riippuvainen tulo- ja poistoilmavirran epätasapainosta ja rakennuksen ulkovaipan tiiveydestä.

Rakennuksen painesuhteiden syntyymiseen vaikuttaa ilmanvaihtojärjestelmän lisäksi lämpötilaeroista syntyvä hormivaikutus sekä tuuli. Epätiivisissä rakennuksissa rakennukseen ilmanvaihtojärjestelmän avulla luotu tai sinne luonnollisten voimien synnyttämä alipaine pyrkii tasoittumaan rakenteiden epätiivyyksien kautta. Rakenteiden kosteusvauriot tulevat esiin rakenteiden läpi tulevien, hallitsemattomien ilmavirtausten kautta. Pelkästään rakennuksen alipaineisuus ei lisää sisäilman mikrobipitoisuutta, mikäli rakenne on pääosin terve, mutta sisäilman mikrobilajisto on todennäköisesti runsaampi [2,6,7].

4. Valesokkelikorjausten kokonaisvaltainen lähestymistapa ja suunnittelu-prosessi

Oulun rakennusvalvontaan saapuvien lupahakemusten perusteella, kengitys on yleisimmin käytetty valesokkeleiden korjaustapa. Joissakin tapauksissa se saattaa olla kuitenkin epätarkoituksenmukainen vaihtoehto. Erityisesti silloin, kun rakenteet ovat kuivia ja mikrobikasvustot ovat passiivisessa tilassa. Tällöin voisi selvittää saadaanko rakenteet pysymään varmuudella kuivina ja mikrobikasvustot passiivisina. Jos se on mahdollista, voisi korjaustapana olla ilmavuotojen estäminen rakenteiden ja liitosten läpi sekä ilmanvaihdon toimivuuden varmistaminen sisältäen painesuhteiden hallinnan. Vaihtoehtoisia korjaustapoja on esitetty diplomityössä valesokkelin kosteusvaurion korjauksista [8].

Jos vauriot ovat eteneviä ja rakennus on muutenkin huonokuntoinen, tulisi selvittää rakennuksen hallitun alasajon ja uudelleenrakentamisen edut ja haitat. Uudelleenrakentamisen etuja ovat

- rakennuksen arvo kasvaa, vanhoista asunnoista maksetaan yleisesti ylihintaa.
- käyttökustannukset todennäköisesti pienensivät
- rakennuksen elinkaarikustannukset olisivat pienemmät kuin osittain korjatussa talossa
- sähkö-, antenni ja tietoliikenneyhteydet sekä sähköturvallisuus saataisiin nykyaikaisiksi
- lämpöviivtyvyys lisääntyisi, asumismukavuus paranisi
- sisäilman laatu paranisi, vaikka korjauksessa saataisiinkin mikrobivauriot poistettua
- jäljelle jäävä riski terveyshaittaan poistuisi.

Uudelleenrakentamisen haittoina ovat muun muassa ympäristökuormituksen lisääntyminen, kierrätyksen haasteet ja hiilijalanjäljen kasvu.

Valesokkeleiden korjaushankkeiden läpivientiin tarvitaan kokonaisvaltainen systemaattinen prosessi [9]. Kokonaisvaltaisen arvioinnin eteneminen

1. Määritetään kohteeseen soveltuvat tekniset vaihtoedot terveyshaitan poistamiseksi
2. Vaihtoeidoille määritetään käyttöikätaavoitteet ja elinkaarikustannukset
3. Vaihtoehtojen riskit arvioidaan
4. Päätös tehdään vertaamalla kustannuksia ja riskejä sekä laatutason nousua.

Tekniset keinot terveyshaitan poistamiseksi ovat 1) mikrobivaurioituneiden rakenteiden uusiminen, 2) rakenteiden tiivistäminen tai vaurioituneiden rakenteiden kapselointi 3) ilmanvaihdon huuhtelukyvyn parantaminen ja 4) edellisten yhdistelmät.

Teknisen korjausvaihtoehdon valintaan vaikuttavat useat tekijät. Ensimmäinen tavoite on varmistaa, että sisäilman korvausilma otetaan hallittujen reittien kautta. Ilmanvaihdon riittävyys ja painesuhteiden hallinta on siten aina otettava suunnittelun lähtökohdaksi. Myös ilmavuodot rakenteiden läpi on estettävä. Painesuhteiden hallinnassa on huomioitava myös liesituulettimen ja tulisijojen tarvitseman korvausilman saanti.

Yhtä tärkeää on varmistaa, että vaurioiden syntyminen tai eteneminen voidaan pysäyttää ja mahdolliset mikrobikasvustot saadaan passiivisiksi. Tähän voidaan vaikuttaa i) sade-, valuma- ja sulamisvesien johtamisella pois rakennuksen viereltä (pihan kallistukset/ korko, sadevesijärjestelmät, patolevyt sokkelin vierellä ja ii) ulkoseinän tuulettamista parantamalla. Salaojien ja routasuojauksen lisääminen on aina harkittava tapauskohtaisesti. Niiden asentaminen saattaa jopa heikentää sokkelin lämpö- kosteusteknisiä olosuhteita.

Korjausmenetelmän valintaan vaikuttaa myös vaurioiden laajuus ja vaikeusaste. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mikäli alajuoksupuun kosteus on alle 18 p%, voidaan harkita kevyitä korjausmenetelmiä ja jos alajuoksupuun kosteus on yli 20 p% on kengitys tai uudelleen rakentaminen todennäköisesti järkevämpiä vaihtoehtoja. Korjausmenetelmän valintaan vaikuttaa myös monet muut rakennuksen ominaisuudet, joihin on vaikeampi vaikuttaa kuten kapillaarinen vedennousu, räystäät, lämpöjohtojen reitit lattian reunoilla ja erityisesti alajuoksupuun korkeusasema maanpintaan nähden. Käytännössä on havaittu, että mikäli alajuoksupuun maanpinnan alapuolella, ovat kosteusvauriot yleisiä ja vaikeita. Kun alajuoksupuun on 10-15 cm maanpintaa korkeammalla, ei kosteusvaurioiden riski ole aina toteutunut. Esimerkiksi 90-luvun rakennuksissa samoin kuin osittain rinnetonttien rakennuksissa tämä vaatimus on usein toteutunut. Kun alajuoksupuun on maanpinnan yläpuolella vaikuttaa kosteusvaurioiden syntyyn erityisesti alajuoksupuun alla olevan kapillaarikatkon kunto tai sen puuttuminen

5. Yhteenveto

Valesokkelikorjauksen lähtökohta on usein epäily mahdollisista kosteusvauriosta tai jo näkyvä vaurio tai tuntuva hajuhaitta. Valesokkelirakenne on nykyisin automaattisesti asunnon arvoa laskeva tekijä, vaikka mitään vauriota ei olisi. Tämä voi johtaa kalliiden korjausten toteuttamiseen “varmuuden vuoksi” mikä ei ole teknisesti eikä taloudellisesti kannattavaa. Valesokkelirakenteissa esiintyvien mikrobivaurioiden terveysvaikutuksia ei ole riittävästi selvitetty, kuin ei myöskään kengityskorjausten kansantaloudellisia vaikutuksia. Joka tapauksessa ulkoseinän ja perustusten liittymän kosteusvauriokorjausten lähtökohtana tulisi aina olla vaurioon johtaneiden tekijöiden ja vaurion todellisen laajuuden selvittäminen. Ulkoisia ja sisäisiä kosteusrasituksia on pyrittävä pienentämään ja otettava hallintaan rakennus- ja LVI-teknisin keinoin. Selvin kehitystarve vaikuttaakin liittyvän korjaussuunnittelun perustana oleviin kuntotutkimuskäytäntöihin sekä suosituksiin eri tilanteisiin käyvästä korjaustavoista. Kehityksen

tueksi tarvitaan tutkimustietoa valesokkelirakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta, vauriomekanismeista, sekä vaurioihin liittyvistä mikrobeista ja niiden terveysvaikutuksista. Erityisiä tutkimuskysymyksiä ovat:

- Millä edellytyksillä valesokkelirakenteeseen syntyy vaurio?
- Miten vuodenaika vaikuttaa rakenteen kosteuteen ja mikrobin esiintymiseen?
- Millaisia ovat valesokkelirakenteessa esiintyvien mikrobin terveysvaikutukset?
- Kuinka varmistetaan kuntotutkimuksen oikeasta laajuudesta, jotta korjaustoimenpiteet voidaan suunnitella luotettavasti ja kohdistaa oikein?
- Kuinka erilaiset korjaustavat ovat vaikuttaneet asukkaiden terveyteen

Valesokkelirakenteiden korjaustapoja on kehitetty paljon viime vuosina, mutta suosituksia siitä millainen korjaustapa sopii tiettyjen vaurioiden ja olosuhteiden yhteyteen ei ole. Koska valesokkeleihin liittyvät vauriot ovat yleisimpiä pien- ja rivitalojen sisäilmaongelmien aiheuttajia tulisi kengityskorjauksiin laatia kokonaisvaltainen tutkimus- ja korjausohje. Korjausohjeeseen tulisi sisällyttää myös erilaisten korjaustapojen valintakriteerit.

Lähdeluettelo

- [1] RT 38964. 2018. RST-valesokkelikenkä. Rakennustietosäätiö.
- [2] RVP-S-RF-62. 2018. Valesokkelirakenne. FISE-Rakennusvirhepankki.
<https://fise.fi/virhekortti/valesokkelirakenne/>
- [3] Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-024-8>
- [4] Eurostat 2019. Share of total population living in a dwelling with a leaking roof, damp walls, floors or foundation, or rot in window frames of floor - EU-SILC survey. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc_mdho01&lang=en
- [5] Björkroth, M. Eskola, L., Rakennusten paine-erojen mittausohje-projektin loppuraportti. A-Insinöörit, 2019
- [6] Kuurola, P., Ilmanvaihtolaitteiston aiheuttama paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Diplomityö. 2016. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [7] Mika Autio. Valesokkelin korjaamisen eri menetelmät. Opinnäytetyö. Kevät 2020. Seinäjoen ammattikorkeakoulu
- [8] Asell, M. 2017. Valesokkelin kosteusvaurion korjaus. Aalto-yliopisto, Diplomityö. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/26131/master_Asell_Marko_2017.pdf?sequence=1
- [9] Teriö, O., Räinen, I., Riippa, T., Hienonen, M. & Kauppinen, T., Asuinrakennusten kosteusvauriokorjaukset - kokonaisvaltainen lähestymistapa. Sisäilmastoseminaari 2021.

Kylmien rakenteiden mikrobit – aliarvioimmeko niiden esiintymistä?

Anna-Mari Pessi¹, Sirkku Häkkinen¹ ja Niko Lindqvist²

¹ Turun yliopisto

² Suomen Rakennusasiiantuntijat Oy

Tiivistelmä

Mikrobien kasvatukseen perustuvat menetelmät pystyvät havaitsemaan vain ne elinkykyiset mikrobit, jotka kasvavat valituilla kasvualustoilla ja valituissa olosuhteissa. Tässä tutkimuksessa vertailtiin valesokkelista otetuista mineraaliviljanäytteissä havaittavaa mikrobikasvua ja -lajistoa viileässä (8 °C) sekä 'huoneenlämmössä' (25 °C) kasvatettuna. Kosteusvauriota indikoivaa *Geomyces* –home oli ainoa ryhmä, jota havaittiin selkeästi enemmän viileässä kuin lämpimässä kasvatettuna. Toisaalta *Aspergillus* ja *Chaetomium* –sukuja havaittiin pääasiassa vain lämpimässä kasvatettuna. Valesokkeliympäristön mikrobien kasvun määrän ja lajistorikkauksen suhteen saatiin selkeästi parempi kuva lämpimässä kasvatettuna.

1. Johdanto

Rakennuksissa voimakkain kosteusrasitus kohdistuu tyypillisesti rakenteisiin, joiden lämpötila on Suomessa suurimman osan aikaa matala: ulkovaippaan ja maanvastaisiin rakenteisiin. Vaikka nämä rakenteet eivät ole suorassa yhteydessä oleskelutiloihin, voi niiden läpi tuleva vuotoilma vaikuttaa sisäilman laatuun, mikäli virheelliset materiaali- ja rakenneratkaisut tai kosteusvauriot johtavat poikkeavaan mikrobikasvuun.

Kaikki kasvatustapahtumat pystyvät havaitsemaan vain ne elinkykyiset mikrobit, jotka kasvavat valituilla kasvualustoilla ja valituissa olosuhteissa. Siksi yleensä valitaan menetelmä, joka kuvaa yleensä parhaiten todellista tilannetta. Useimpien homesienien kasvun tyypillinen optimilämpötila on 20–35 °C, mistä syystä homekasvua tutkitaan viljelymenetelmillä yleensä tällä lämpötila-alueella. Esim. Asumisterveysasetuksen mukaisissa viljelymenetelmissä kasvatuslämpötilana on 25 °C [1]. Tällöin puhutaan lämpötilan suhteen mesofiilistä, kohtalaisessa lämmössä viihtyvistä mikrobeista; alkuliite *meso* tulee kreikan sanasta 'keskellä'. Monet sienet kuitenkin kasvavat viileämmässä. Tällöin puhutaan joko kylmää sietävistä mikrobeista (psykrotoleranteista), jotka pystyvät kasvamaan myös viileässä, tai kylmää suosivista (psykrofiilistä) mikrobeista, joiden optimikasvulämpötila on alle 15 °C. Osa viileään sopeutuneista homeista ei edes kasva yli 20 °C lämpötilassa. Siksi on mahdollista, että viileää ympäristöä suosivan mikrobilajiston kasvu jää käytetystä kasvatustapahtumasta johtuen huomaamatta tai aliarvioitua.

Valesokkelirakenteessa (piilosokkeli) ulkoseinän alasidepuu sekä lattian pinta sijaitsevat maanpinnan tasolla tai jopa sen alapuolella [2]. Rakenteeseen ulkoa tai sisältä kertyvä kosteus kuivuu huonosti ja riskinä on ulkoseinän alaosien puuosien vaurioituminen ja lahoaminen. Vaurioituminen on usein havaittavissa myös eristekerroksessa. Vaikka sisätiloista siirtyykin rakenteeseen lämpöä, on se maanvastaisena ja rakennuksen ulkokuorirakenteena selkeästi sisätiloja viileämpi.

2. Menetelmät

Tässä tutkimuksessa vertailtiin valesokkelirakenteen mineraalivillaeristeessä havaittavaa mikrobikasvua ja -lajistoa kahdessa eri lämpötilassa kasvatettuina. Aineisto koostui Suomen rakennusasiantuntijat Oy:n ottamista pientalojen kuntotutkimusnäytteistä (n = 35) Business Finlandin rahoittaman 'Riidaton asuntokauppa' -hankkeen yhteydessä 7/2020 – 3/2021. Näytteet otettiin valesokkelirakenteen mineraalivillaeristeestä alaohjauspuun ja runkotolpan liittymäkohdasta ja toimitettiin Aerobiologian laboratorioon postitse tai paikanpäälle tuotuina. Näytteenotto ei perustunut havaittuun kosteusvaurioon vaan riskirakenteen olemassaoloon.

Näytteet viljeltiin Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen [1] mukaisella suoraviljelymenetelmällä THG, M2, Hagem ja DG-18 alustoille ja kasvatettiin 25 ± 3 °C. 7 vrk kuluttua M2, Hagem ja DG-18 määritettiin kasvun määrä käyttäen suhteellista +/- -asteikkoa sekä sienilajisto; lajistotunnistus varmennettiin 9-14 vrk kuluttua ikäisistä pesäkkeistä. THG -alustoilta määritettiin aktinomykeettikasvun määrä 14 vrk ikäisistä kasvatuksista. Samoin viljelty rinnakkaiset osanäytteet viljeltiin 8 ± 3 °C lämpötilassa. Viileäkasvatuksen kesto oli 28 vrk, jonka jälkeen määritettiin sieni- ja aktinomykeettikasvun määrä samalla suhteellisella asteikolla sekä sienilajisto.

Mikrobikasvun esiintymistä (Kuva 1) näytteissä arvioitiin pesäkemäärän ja lajiston suhteen Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen [1] mukaisesti. Runsas aktinomykeetti- tai sienipesäkkeiden määrä tulkittiin mikrobikasvustoksi ja mikrobikasvustoon viittaavaksi löydökseksi silloin, kun mikrobeja on kohtalaisesti tai niukasti, mutta lajistossa oli useita nk. soveltamisohjeen mukaisia kosteusvaurioidikaattoreita enemmän kuin yksittäisinä pesäkkeinä [3]. Viileässä kasvatettuja näytteitä arvioitiin samoilla pesäkemäärä- ja lajistokriteereillä.

3. Tulokset

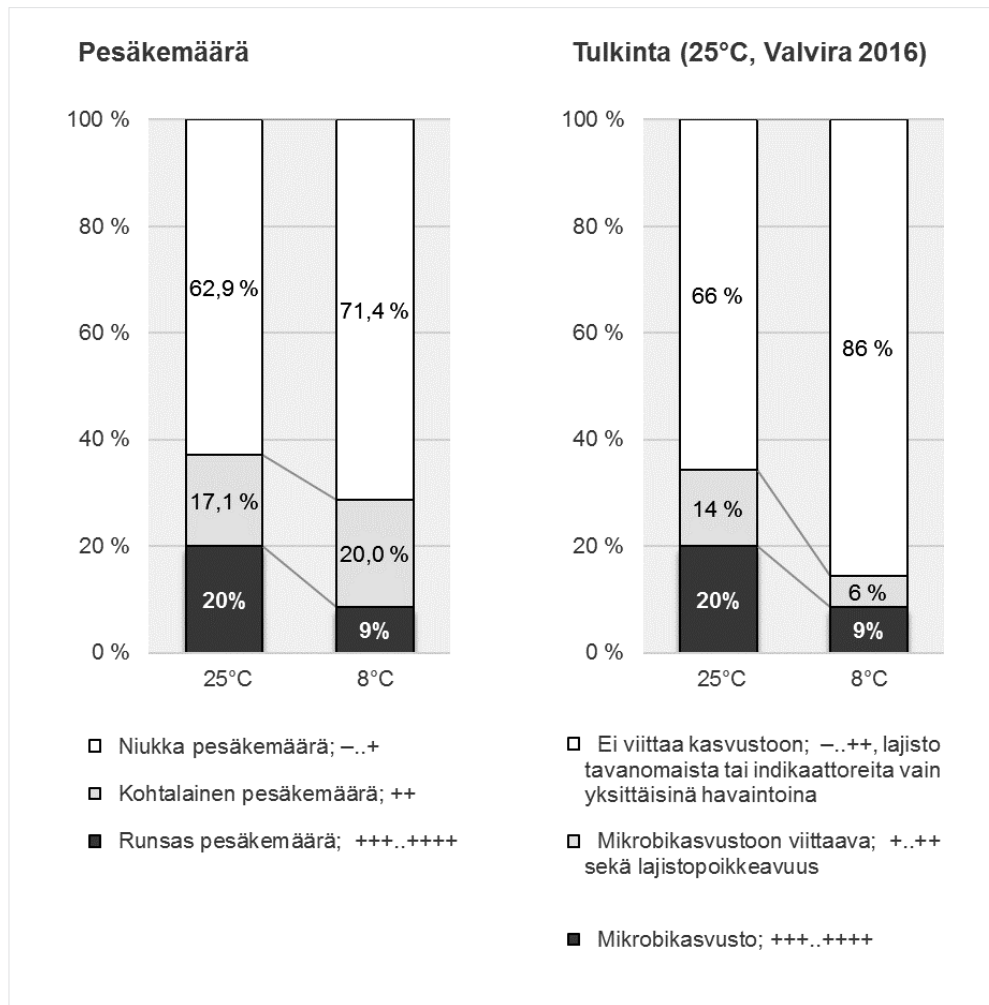
Lämpimässä, 25 °C lämpötilassa, kasvatetuista näytteistä havaittiin 20 % runsas pesäkemäärä, jonka tulkitaan osoittavan mikrobikasvustoa (Kuva 1). 14% näytteistä viittasi mikrobikasvustoon lajistopoikkeavuuden perusteella. Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen [1] perusteella 34 % näytteistä ylitti siis nk. toimenpiderajan. Sen sijaan 8 °C lämpötilassa kasvatettuna runsasta mikrobikasvua havaittiin vain 9 % näytteistä. Kyseiset näytteet osoittivat runsasta kasvua myös lämpimässä kasvatettuna. Runsas mikrobikasvu oli aina yhteydessä kuivaa suosiviin mikrobeihin - kaikilla muilla kasvualustoilla havaittu runsas kasvu, mukaan lukien aktinomykeettikasvu, niin viileässä kuin lämpimässä, havaittiin runsaana mikrobikasvuna myös DG18-alustalla 25 °C lämpötilassa. Kohtalaisia pesäkemääriä havaittiin molemmissa lämpötiloissa viljeltynä suunnilleen yhtä paljon, 17 % lämpimässä ja 20 % viileässä.

Lajistosta *Geomyces* -suku (nyk. *Pseudogymnoascus*) oli ainoa ryhmä, jota havaittiin selkeästi enemmän viileässä (40 % näytteistä) kuin lämpimässä kasvatettuna (11 %) (Taulukko 1.). Vaikka ko. home ei kasvanut yhdessäkään näytteessä runsaana, havaittiin sitä viileässä kasvatettuna 2/3 kaikista näytteistä, jotka ohjeistuksen mukaan ylittäisivät toimenpiderajan. *Penicillium*- ja *Cladosporium* -suvut olivat yleisimpiä molemmissa viljelyissä, samoin steriilit rihmat. Ko. ryhmä koostuu sienistä, jotka eivät tuottaneet joko ko. alustalla tai viljelyajan puitteissa tunnistamiseen käytettäviä itiöitä tai muita rakenteita; ryhmä koostuu siksi monista eri sienisuvuista. On todennäköistä, että osa 25 °C lämpötilassa tunnistetuista ryhmistä on viileässä kasvatettuna jäänyt steriiliksi. Lämpöä suosiva *Aspergillus*-suku oli 25 °C lämpötilassa kasvatettuna kolmanneksi yleisin sienisuku, jota havaittiin yli 60 % näytteistä; viileässä kasvatettuna suvun lajeja havaittiin vain satunnaisesti. *Chaetomium* -sukua ei havaittu viileässä lainkaan, lämpimässä noin

kolmasosassa näytteitä. Muutenkin lämpimässä kasvatettuna havaittiin selkeästi useampia sieniryhmiä (31 kpl) kuin viileässä (15 kpl).

Taulukko 1. Valesokkelirakenteen mineraalivillanäytteistä havaittu sienilajisto sekä aktinomykeettihavainnot (osuudet ja havaintojen lukumäärä näytteistä) +25 ° ja 8 °C lämpötiloissa kasvatettuina; x = havaintoja alle 10% näytteistä, - = ryhmää ei havaittu; * = kosteusvaurioindikaattori, l.r. = lajiryhmä, s.r. = sukuryhmä;

Mikrobiryhmä	25 °C % (kpl)		8 °C % (kpl)	
<i>Penicillium</i> spp.	85,7 %	(30)	68,6 %	(24)
<i>Cladosporium</i> spp.	80,0 %	(28)	74,3 %	(26)
steriilit rihmat	77,1 %	(27)	57,1 %	(20)
<i>Aspergillus</i> –suku	65,7 %	(23)	x	
<i>Aspergillus restricti</i> l.r. *	42,9 %	(15)	x	
<i>Aspergillus versicolores</i> l.r. *	34,3 %	(12)	x	
<i>Aspergillus, Eurotium</i> l.r. *	22,9 %	(8)	–	
<i>Aspergillus flavus</i>	x		–	
<i>Aspergillus fumigatus</i> l.r. *	x		–	
<i>Aspergillus ochraceus</i> l.r. *	x		–	
<i>Aspergillus</i> spp.	x		–	
Hiivat	40,0 %	(14)	45,7 %	(16)
<i>Sporobolomyces</i> spp.	x		–	
muut	40,0 %	(14)	45,7 %	(16)
<i>Geomyces</i> s.r. * (<i>Pseudogymnoascus</i>)	8,6 %	(3)	40,0 %	(14)
<i>Chaetomium</i> s.r. *	34,3 %	(12)	–	
<i>Aureobasidium</i> spp.	17,1 %	(6)	17,1 %	(6)
<i>Alternaria</i> –suku	14,3 %	(5)	–	
<i>Alternaria, Ulocladium</i> l.r. *	x		x	
<i>Alternaria</i> spp., muut	14,3 %	(5)	–	
<i>Absidia</i> sp.	x		–	
<i>Acremonium</i> s.r.*	x		x	
<i>Blastobotrys</i> spp.	x		x	
<i>Botrytis</i> spp.	–		x	
<i>Exophiala</i> s.r. *	x		x	
<i>Fusarium</i> s.r. *	x		–	
<i>Hyalodendron</i> spp.	x		x	
<i>Mucor</i> sp.	x		–	
<i>Phoma</i> spp.	x		x	
<i>Pithomyces</i> sp.	x		–	
<i>Sarocladium</i> sp.	x		–	
<i>Scedosporium</i> sp.	x		–	
<i>Sporothrix</i> sp.	x		–	
<i>Trichoderma</i> spp.*	x		–	
<i>Wallemia</i> sp.*	x		–	
aktinomykeetit	37,1 %	(13)	25,7 %	(9)



Kuva 1. Näytteiden osuudet pesäkemääräluokittain sekä tulkinta mikrobikasvuston esiintymisestä näytteessä pesäkemäärän ja lajiston perusteella. Asumisterveysasetuksen mukaisen toimenpiderajan ylittyminen on määritelty mikrobikasvustona tai mikrobikasvustoon viittaavana löydöksenä [1]; viileässä kasvatettujen suhteen on käytetty samaa tulkintaa.

4. Pohdinta

Valesokkelien mikrobivaurioitumisen arvioinnin kannalta ei viileässä kasvataminen tuonut merkittävää lisätietoa – kaikki näytteet, jotka osoittivat viileässä kasvatettuna mikrobikasvustoa, osoittivat kasvustoa myös 25 °C asteessa. Valesokkelirakenteen lämpötila nousee suuren osan vuotta 15 °C yläpuolelle ja toisaalta laskee eristeen ulkopinnalla talvikautena selkeästi pakkasen puolelle [esim. 4], joten olosuhteet eivät ole viileää suosivien maaperämikrobien kannalta suotuisia. On kuitenkin mahdollista, että syvemmällä olevat maanvastaiset rakenteet saattavat olla niiden kannalta parempia.

Vaikka nyt käsitelty aineisto oli suppea ja vain yhteen rakenteeseen ja materiaaliin (mineraalivilla) kohdistuva, oli tavanomaisen viljelymenetelmän aliarvioivuus viileää suosivan lajiston suhteen selvää: *Geomyces* -suvun havainnot yli nelinkertaistuivat 8,6 %:sta 40 %:iin. Lisäksi suku oli tutkitussa rakenteessa ilmeisen yleinen. Esimerkiksi laajassa suomalaisessa mikrobivaurioituneiden rakennusmateriaalien lajistotutkimuksessa todettiin *Geomyces* homeiden esiintyvyyden olevan mineraalivilloissa 0,5 % ja korkeimmillaan 2,7% puumateriaaleilla [5]. Siihen nähden jo 25 °C lämpötilassa havaittu 8,6 % esiintyvyys samassa rakennusmateriaalissa on korkea, ja johtunee ympäristöolojen lisäksi vaurioherkästä rakenteesta otetuista näytteistä.

Geomyces -suvun yhteys rakennusten mikrobivaurioihin on tunnettu. Suomessa se on luokiteltu kosteusvaurioindikaattoriksi [1], millä tarkoitetaan kosteusvaurioituneissa materiaaleissa ja vaurioituneiden rakennusten ilmassa esiintyviä mikrobiryhmiä, joita harvemmin esiintyy vauriottomien rakennusten rakenteissa ja ilmassa [3]. *Geomyces* -sukuun kuuluvat lajit ovat yleisiä viileässä ympäristössä; esimerkiksi *G. pannorum* lajia on eristetty laajasti arktisen alueen ja Antarktikan maaperästä. Suvun lajien tiedetään olevan hyvin kylmää sietäviä, hidasta kasvua tapahtuu yleisesti 0 °C lämpötilassa ja joillakin kannoilla jopa 2 °C lämpötilassa [6]. Eräillä suolapitoisesta ympäristöstä eristetyillä kannoilla kasvun on todettu olevan jopa nopeampaa 4 °C kuin 26 °C:ssa [6]. Norjassa tehdyssä maanpinnan alaisten kellaritilojen ja alapohjarakenteiden mikrobivaurioita selvittävässä tutkimuksessa Nunez ja Hammer [7] havaitsivat *Geomyces* homeita yleisemmin näiden tilojen katto- ja seinäosissa, eli puurakenteissa, joiden kosteusrasitus on pitkäaikaista muttei niin voimakasta kuin kellarirakenteiden lattiaosissa. Grant ym. [8] laboratoriodokeiksiin perustuvassa luokittelussa laji arvioitiin sekundäärisesti kolonisoijaksi, jonka vesiaktiivisuusvaatimus on 12 °C lämpötilassa a_w 0,80 – 0,90.

On itsestään selvää, että lämpötila vaikuttaa mikrobien kasvunopeuteen; viileässä ympäristössä vauriot syntyvät hitaammin. Tämä on huomioitu VTT:n ja TTY:n kehittämässä homemallissa, jossa homeen kasvua on pyritty mallintamaan ajan funktiona muuttuvissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa eri tyyppisten rakennusmateriaalien pinnoilla [10, 11]. Rakenteeseen syntyvän lajiston merkitystä ei kuitenkaan ole aina huomioitu riittävästi. Vaikka viileään sopeutuneet kasvavat mikrobit yleensä ovat hidaskasvuisia, on niillä selvä kilpailuetu viileissä ympäristöissä. Todellisessa rakennusympäristössä kuhunkin rakenteeseen valikoituu sen olosuhteissa parhaiten kilpailussa selviytyvä mikrobilajisto, joka muuttuu vaurion edetessä jatkuvasti.

Lämpötilan käyttäminen viljelymenetelmän osana on yleistä sienitauteja aiheuttavien sieniä tutkittaessa; tällöin näytteet viljellään 37 °C lämpötilassa. Rutiinimenetelmänä viileässä viljely tuskin toisi merkittävää lisätietoa korjaustarvetta selvittävälle, itse asiassa jopa vähäisempi kasvualustamäärä riittäisi kasvuston osoittamiseen. Koe osoitti kuitenkin jo pitkään tunnetun faktan: viljelymenetelmillä havaitsemme vain käytetyillä kasvatusalustoilla ja olosuhteissa kasvavat elinkykyiset mikrobit. Viljelymenetelmien vaihtuessa tulevaisuudessa DNA-pohjaisiin menetelmiin tämä nykyisissä viljelyolosuhteissa heikosti esille tuleva lajisto, mahdollisesti rakennuksen vaurion tai ihmisen terveyden kannalta merkityksellinen, tulee paremmin havaituksi.

5. Yhteenveto

Valesokkelirakenteen eristenäytteistä tehdyt viljelmät olivat 25 °C lämpötilassa kasvatettuna määrällisesti ja lajistomääriltään runsaammat kuin viileämmässä, 8 °C, lämpötilassa kasvatetut. Lajistosta poikkeuksen teki ainoastaan viileään ympäristöön sopeutuneeksi tiedetty *Geomyces* – home, jonka esiintyvyys oli viileässä kasvatettuna selkeästi korkeampi. Vaikka nyt tehty selvitys oli suppea ja rajoittui yhteen rakennusmateriaaliin ja vain yhteen riskialttiiseen rakennetyyppiin, osoitti se nykyisin vakiona käytettävän viljelymenetelmän puutteet viileää suosivan lajiston havaitsemisessa. Valesokkelin ei kuitenkaan ole lämpötilaltaan niin poikkeava ympäristö, että nykyiset viljelymenetelmät eivät riittäisi mikrobivaurioitumisen havaitsemiseen ko. rakenteessa.

Lähdeluettelo

- [1] Valvira, Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa IV, ohje 8/2016. Saatavissa: <https://www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveydensuojelu/asumisterveys>
- [2] Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. ja Annala, P. 2019. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. 284 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-024-8>
- [3] Pessi, A-M. ja Jalkanen, K. 2018. Laboratorio-opas. Mikrobiologisten asumisterveys-tutkimuksien näytteenotto ja analyysimenetelmät. Suomen Ympäristö- ja Terveysalan Kustannus Oy. 76 s. ISBN 978-952-9637-61-4.
- [4] Ruutikainen, P. Valesokkeli- ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen mallintaminen. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, 2017. 62 s.+20 liites. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017053111290>
- [5] Hyvärinen, A., Meklin, T. Vepsäläinen, A, ja Nevalainen, A. 2002. Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials — concentrations and diversity. *International Biodeterioration & Biodegradation* **49**, 27 – 37. DOI: 10.1016/s0964-8305(01)00103-2
- [6] Kochkina, G., Ivanushkina, N., Akimov, V., Gilichinskii, D. ja Ozerskaya, S. 2007 Halo- and psychrotolerant *Geomyces* fungi from arctic cryopegs and marine deposits. *Microbiology* **76**, 31–38. DOI: 10.1134/S0026261707010055
- [7] Nunez, M. ja Hammer, H. 2012. Microbial specialists in below-grade foundation walls in Scandinavia. *Indoor Air* **24**, 543–551. doi:10.1111/ina.12095
- [8] Grant, C., Hunter, C., Flannigan, B. and Bravery, A. 1989. The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. *International Biodeterioration* **25**, 259–284. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(89\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0265-3036(89)90002-X)
- [9] Lähdesmäki, K., Salminen, K., Vinha, J., Viitanen, H., Ojanen, T. ja Peuhkuri, R. 2011. Mould growth on building materials in laboratory and field experiments. In: *9th Nordic symposium on building physics*. **2**, 859–866.
- [10] Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J. ja Salminen, K. 2011. Classification of material sensitivity – new approach for mould growth modeling. In: *9th Nordic symposium on building physics*. **2**, 867-874

Kuntotutkimus korjaussuunnittelun pohjana

Aaro Kivelä¹, Hannu Fagerlund¹ ja Riku Hyttinen²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy

² Hämeen ammattikorkeakoulu / Hämeenlinnan seudun opiskelija-asuntosäätiö

Tiivistelmä

Osana *Kuntotutkimus korjaussuunnittelun pohjana* -opinnäytetyötä tehtiin rakenne- ja kosteusteknistä kuntotutkimusta 16:en vuonna 1988 valmistuneeseen rivitaloon ja yhteen yhteiskäytössä olleeseen rakennukseen Hämeenlinnassa. Rakennusten kuntoa selvitettiin peruskorjaushankkeen hankesuunnittelua varten ja tavoitteena oli parantaa rakennusten energiatehokkuutta korjausten yhteydessä. Tilaajan tavoitteena oli saada hankkeelle tukea Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskukselta.

Tutkittuihin rakennuksiin oli kertynyt peruskorjausvelkaa ja niistä löydettiin kosteus- ja mikrobivaurioituneita rakenteita, joiden korjauslaajuus oli merkittävä. Kuntotutkimuksen löydösten perusteella annettiin korjaussuosituksia ja tehtiin alustava korjaussuunnitelma kolmella eri energiatehokkuutta parantavalla korjaustavalla. Korjaustapojen takaisinmaksuaikoja vertailtiin toisiinsa. Purkuvaihtoehtoa ei tilaajan toiveesta tutkittu tässä yhteydessä. [4]

Korjausten kustannusten suora takaisinmaksuaika ja netto nykyarvon perusteella laskettu takaisinmaksuaika venyivät huomattavasti. Korjauskustannuksia ei saatu kuoletettua yhdelläkään tutkitulla korjaustavalla rakenteiden teknisten käyttöikien puiteissa. [4]

1. Johdanto

Tämä artikkeli perustuu vuonna 2021 valmistuneeseen opinnäytetyöhön Kuntotutkimus korjaussuunnittelun pohjana ja tässä kerrotaan työn tuloksista. Työn tilaaja halusi selvittää, miten vaurioiden korjaamiseen liitettyä energiatehokkuuden parantamista voisi hyödyntää hankesuunnittelua edeltävässä alustavassa korjaussuunnittelussa. Tilaajan tarkoituksena oli hakea korjauksiin avustusta, jonka yhtenä ehtona oli energiatehokkuuden parantaminen, jota ARA arvioi E-luvun avulla [6]. Hankkeen hiilijalanjälki ei ollut yksi tuen saamisen kriteereistä, joten sitä ei tässä yhteydessä tutkittu. Hiilijalanjäljen laskennalla ei siis tässä hankkeessa ollut taloudellista merkitystä tilaajan näkökulmasta. Kuntotutkimusraportti on puolestaan yksi ARA:n kuntotutkimus- ja perusparannuksen suunnittelun tuen saamisen edellytys [7].

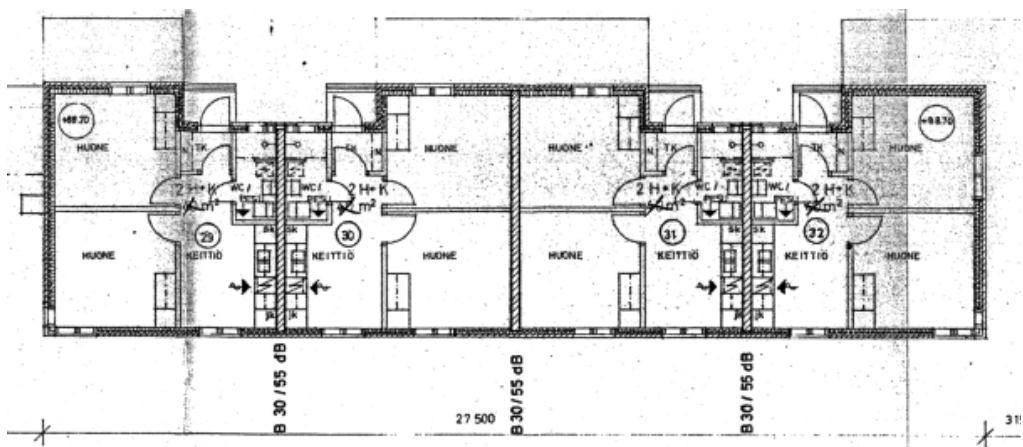
Tutkin olemassa olevien yleisten korjaussuosistusten mukaisia korjaustapoja suhteessa tilaajalle annettuihin korjaussuosituksiin, ja vertailin niiden kustannuksia. Taloudellista kannattavuutta vertaillaessa on huomioitu energiatehokkuuden parantamisesta saatavat säästöt laskennallisessa energiankulutuksessa. Korjauksen sekä purkamisen ja uuden rakennuksen rakentamisen kustannuksia ei vertailtu, koska se ei tässä kohteessa ollut käytännössä mahdollinen vaihtoehto.

2. Tutkittavat rakennukset

Tutkittavia rakennuksia oli kahta tyyppiä, joista laskennan pohjaksi valittiin neljästä soluasuunnosta koostuva puurunkoinen ja tiiliverhottu yksikerroksinen rivitalorakennus. Rakennus edusti tutkittua rakennuskantaa hyvin, koska puolet tutkituista rakennuksista oli rakenteiltaan ja

korjaushistorialtaan identtisiä sen kanssa. Kaikissa tutkituissa taloissa oli koneellinen poistoilmanvaihto ja lämmitysmuotona kaukolämpö. Kaikissa tutkituissa rakennuksissa oli valesokkeli, jonka lattiapinta oli kuitenkin puurungon alapuolella. Kaikki tutkitut rakennukset olivat maanvaraisesti perustettuja.

Korjattava rakennus ja sen ympäristö asettavat tiettyjä vaatimuksia, mikä tekee kosteusvauriokorjauksista uudisrakentamiseen verrattuna monimutkaisempaa ja kustannuksiltaan korkeampaa [1]. Näin kävi tässäkin tapauksessa, sillä rakennuksista oli kertynyt korjausvelkaa niiden elinkaaren aikana, kun peruskorjaustoimenpiteitä oli lykätty. Esimerkiksi puutteellisesta pintavesien ohjauksesta ja huonokuntoisesta vesikatosta oli aiheutunut vaurioita rakenteille. Toisaalta energiatehokkuuden parantamisella haluttiin saada kustannussäästöjä ja kattaa syntyneitä korjauskustannuksia, mutta esimerkiksi energiatehokkuutta parantava ilmanvaihtojärjestelmän uusiminen asettaa erityisiä vaatimuksia mikrobivaurioituneiden rakenteiden korjaukselle ja käytetyille korjaustavoille.



Kuva 1. Laskennan pohjana käytetty rivitalorakennus. (Lähde: ARK-pohjapiirustus, Rakennussuunnittelutoimisto Hannu Elfving Oy, 2.6.1987)

3. Rakennusten merkittävimmät korjaustarpeet

Alustavien tietojen perusteella suurimmat puutteet liittyivät pintamaan kallistuksiin, sadevesien johtamiseen ja salaojien toimintaan. Tutkimusten edetessä paljastui, että myös vesikatkon liittymien tiiveydessä on laajoja puutteita. Taloihin oli tehty mm. salaojien peruskorjauksia ja vesikatkon liittymien tiivistämistä, mutta korjauslaajuus oli jäänyt pieneksi ja korjaustapa ei ollut onnistunut. Kiinteistöstä tehtyjen aikaisempien tutkimusten korjaussuosituksia ei ollut noudatettu kaikilta osin. Kosteuskartoituksen perusteella maaperästä kapillaarisesti noussut kosteus ei vaikuttanut alapohjan maanvaraisen laatan rakennekosteuteen haitallisesti, mutta sokkelirakennetta se oli vaurioittanut. [4]

Sokkelirakenteessa oli useita pystysuuntaisia halkeamia, joten mahdollisen painuman ja roudan vaikutusta niiden syntyyn selvitettiin. Maanvaraisen laatan täyttönä oli tiivistettyä hiekkaa ja kivimurskettä, eikä painumasta tehty havaintoja. Routavauriot keskittyivät lumesta puhtaana pidettyjen kulkuväylien läheisyyteen, mutta niitä oli havaittavissa muuallakin rakennuksen ympärillä. [4]

Pintamaan kallistukset olivat monissa paikoin puutteellisia ja ohjasivat pintavesiä kohti rakennusta. Salaojajärjestelmiä oli korjattu vain pätkittäin ja ne olivat suurelta osin alkuperäiset. Varsinainen sadevesijärjestelmä puuttui ja sadevedet imeytettiin tontilla maastoon. Sokkelissa ja ulkoseinien Kahi-tiilimuurauksessa oli rapautumaa ja maanpinta oli paikoin ylempänä kuin ulkoseinän alaohjauspuu. Tiiliverhouksessa ei ollut tuuletusrakoja. Sokkelin pinnassa oli nähtävissä kosteuden kapillaarista nousua ja kaikissa rakenneavauksissa oli näkyvissä silminnähten kosteusvaurioituneita rakenteita. Lahoja ei havaittu. [4]

Sokkelirakenteeseen tehdyistä rakenneavauksista otetuissa materiaalinäytteissä todettiin vahva viite kosteus- ja mikrobivauriosta. Näytteet otettiin alaohjauspuusta, ulkoseinäelementin ohjauspuusta ja mineraalivillaeristeestä. Paineekyllästetty alaohjauspuu ja rakennuksen puurunko olivat silminnähten arvioituna vielä kohtuullisen hyvässä kunnossa. [4]

Peltikatteeseen ja läpivienteihin liittyvät korjaustoimenpiteet aloitettiin turvaavana toimenpiteenä kuntotutkimusten vielä ollessa käynnissä. Niistä aiheutuneita kustannuksia ei ole huomioitu kustannuksia vertailtaessa. Vesikaton liittymistä vuotanut vesi oli kastellut yläpohjan puhallusvillaeristeitä ja höyrynsulkumuovia sekä alakaton levytyksen läpi joihinkin asuntoihin. Yläpohjassa oli nähtävissä ilmavuodon aiheuttamia kosteusvaurioita asuntojen välisissä yläpohjan palo-osastoivissa kipsilevyseinissä. Yläpohjan höyrynsulku ei siis ollut tiivis. Yläpohjasta otettiin materiaalinäytteitä mikrobianalyysejä varten höyrynsulun sisäpuolelta alakaton levytyksestä. Kaikissa näytteissä todettiin vahva viite kosteus- ja mikrobivauriosta. [4]

3.1 Johtopäätökset ja toimenpide-ehdotukset

Vaurioituneiden rakenteiden uusimisen lisäksi suositeltiin niiden kokonaisvaltaista korjaus- ja energiatehokkuussuunnittelua. Toimenpide-ehdotuksia annettiin mm. seuraavasti:

- Pintamaan muotoilujen korjaaminen kaikkien rakennusten ympärillä.
- Salaoja- ja sadevesijärjestelmän uusiminen, perusmuurilevyn asennus ja rakennusten routaeristyksen parannus.
- Yläpohjan kastuneiden ja mikrobivaurioituneiden eristeiden uusiminen ja yläpohjan höyrynsulun tiiveyden parantaminen.
- Sokkelin ja ulkoseinien mikrobivaurioituneiden rakenteiden uusiminen ja höyrynsulun tiiveyden parantaminen.
- Puutteellisen poistoilmanvaihdon muuttaminen nykyaikaiseksi tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmäksi lämmön talteenotolla. [4]

4. Korjaustavat, energiatehokkuus ja takaisinmaksuaika

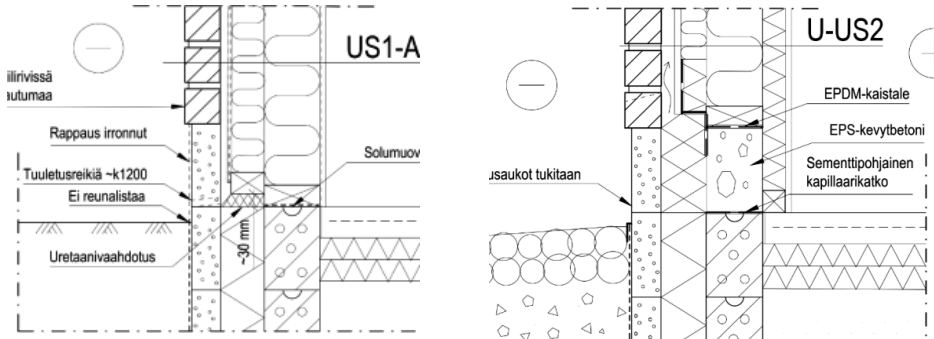
Suurimmat korjaustarpeet liittyivät kosteus- ja mikrobivaurioituneeseen valesokkelirakenteeseen ja yläpohjien kosteus- ja mikrobivaurioihin sekä vuotavaan vesikattoon. Vesikatteen korjauskustannukset eivät ole laskelmassa mukana. Kaikissa korjausvaihtoehdoissa energiatehokkuutta parannettiin ikkunoita vaihtamalla. Ikkunat olisivat kevyimmilläänkin vaatineet maalaus- ja tiivistystyötä. Kaikkiin korjaustapoihin sisältyi salaoja- ja sadevesijärjestelmän uusiminen ja perustusten routaeristys sekä sisäkattojen uusimista ja höyrynsulun tiivistämistä myös yläpohjassa.

Ulkoseinästä, sokkelista ja yläpohjasta laadittiin uudet rakennetyypit, joihin on valittu alkuperäistä rakennetta paremmin kosteutta ja muuttuvaa ilmastoa paremmin kestäviä materiaaleja. Sokkelin korjausvaihtoehtoina olivat perinteinen harkolla kengitetty sokkelirakenne, valulla tehtävä EPS-kevytbetoninen patentoitu korjausmenetelmä ja teräskengitetyt

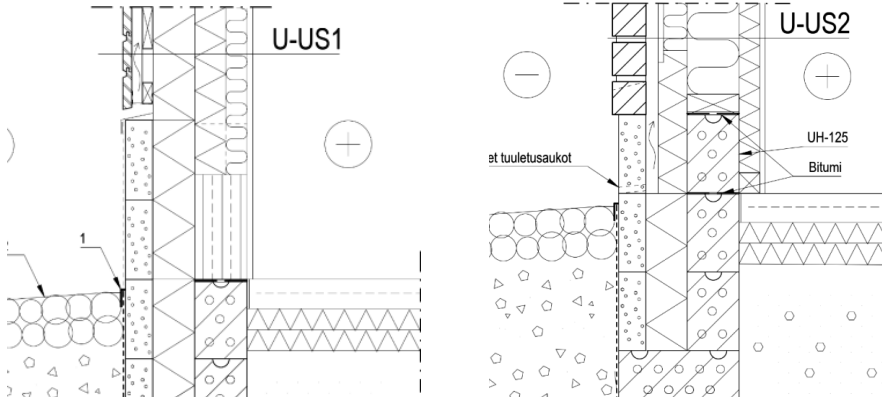
eristettyihin sokkelipalkkeihin ja valmisosiin perustuva sokkelirakenne. Ulkoseinän rakennetyyppien suunnittelussa lähtökohtana oli kosteus- ja mikrobivaurioiden korjaus, höyrynsulun tiiveyden parantaminen ja rakenteen lämmöneristävyuden parantaminen.

4.1 Korjaustavat

Kustannuslaskennan pohjana olevalle rakennukselle tehtiin työssä kolme alustavaa korjaustapaa, joilla pyrittiin parantamaan rakennuksen energiatehokkuutta ja siten kuolettamaan osa korjauskustannuksista. Pelkkää tiivistyskorjausta ei suositeltu kuin väliaikaiseksi käyttöä turvaavaksi toimenpiteeksi. [4]



Kuva 3. Sokkelirakenteen periaatepiirustukset alkutilanteessa (vasemmalla) ja korjaustavalla 2. (A-Insinöörit Suunnittelu Oy / Aaro Kivelä 11.12.2020)



Kuva 4. Sokkelirakenteen periaatepiirustukset korjaustavalla 1 (vasemmalla) ja korjaustavalla 3. (A-Insinöörit Suunnittelu Oy / Aaro Kivelä 11.12.2020)

Raskaimmassa korjaustavassa yksi ulkoseinän tiiliverhous ja eristeet purettaisiin kokonaan ja korvattaisiin vaakaponttilaudoituksella sekä polyuretaanipohjaisilla alumiinipäällysteisillä eristeillä ja kivivillalla. Tässä korjaustavassa sokkelirakenne korjattaisiin tehdasvalmisteisilla teräskengillä ja sokkelipalkeilla. Sokkelin arvioitu korjausaste olisi 100%. Yläpohjan kaikki eristeet uusittaisiin tässä vaihtoehdossa. Ilmanvaihto uusittaisiin nykyaikaiseksi LTO-järjestelmäksi. [4]

Korjaustapa kaksi tarkoitti ulkoseinien alaosan eristeiden purkamista noin 1 metrin korkeudelta. Sisäpuolelle asennettaisiin 50 mm paksu alumiinipintainen polyuretaanieriste ja tiiliverhoukseen

tehtäisiin vain paikkauskorjauksia. Sokkelirakenne korjattaisiin EPS-kevytbetonilla menetelmäpatentin ohjeiden mukaisesti. Sokkelin arvioitu korjausaste olisi 100 %. Yläpohjasta poistettaisiin eristettä keskimäärin 50 mm ja uutta eristettä lisättäisiin 300 mm. Tällä korjaustavalla ilmanvaihdolle ei tehtäisi muutoksia. [4]

Korjaustavassa kolme ulkoseinien alaosan eristeitä purettaisiin noin 1 metrin korkeudelta. Sisäpuolelle asennettaisiin 50 mm paksu alumiinipintainen polyuretaanieriste ja tiiliverhoukseen tehtäisiin vain paikkauskorjauksia. Sokkelirakenne korjattaisiin kevytsoraharkolla kengittämällä. Sokkelin arvioitu korjausaste olisi 10 %. Yläpohjasta poistettaisiin eristettä keskimäärin 50 mm ja uutta eristettä lisättäisiin 350 mm. Ilmanvaihto uusittaisiin nykyaikaiseksi LTO-järjestelmäksi. [4]

4.2 Energiategohkuus

Energiategohkuutta vertailtiin laskennalliseen standardikäyttöön perustuvan energiategohkuuden avulla. Laskenta tehtiin voimassa olevien säännösten ja ohjeiden mukaan Cadmatic 18 Draw -ohjelman Energialaskenta 2018 -toiminnolla, jolla laskettiin E-luku energiategohkuusasetuksen mukaisesti. [2] E-lukuvaatimus täyttyi laskennallisesti jokaisella korjaustavalla korjaus- ja muutostöitä säätelevän energiategohkuusasetuksen (4/13) mukaisesti. Rivitalon E-lukuvaatimus saatiin laskemalla alkutilanteen E-luku ja kertomalla se luvulla 0,8. Myös asetuksen 4 §:n rakennusosakohtaiset vaatimukset uusitulle rakennusosalle täyttyivät kaikilla korjaustavoilla. [3]

Taulukko 1. Laskennallinen standardikäyttöön perustuva energiategohkuus eri korjaustapoja käytettäessä. Ulkoseinän RAK-tyypit, E-lukut, energiategohkuusluokka ja U-arvot

Rakenneosa / U-arvo [W/m ² K]	RAK-tyyppi	E-luku / luokka	US	AP	YP	Ikkunat	Ovet
Nykytilanne	US1-A	160 / D ₂₀₁₈	0,23	0,4	0,17	2,1	1,4
Korjaustapa 1	U-US1	90 / B ₂₀₁₈	0,13	0,4	0,08	0,7	0,5
Korjaustapa 2	U-US2	114 / C ₂₀₁₈	0,15	0,4	0,08	0,7	0,5
Korjaustapa 3	U-US2	91 / B ₂₀₁₈	0,15	0,4	0,08	0,7	0,5

4.3 Takaisinmaksuaika

Energiategohkuuden parantamisen vaikutusta investoinnin kannattavuuteen vertailtiin suoran takaisinmaksun ja nettonykyarvon menetelmillä. [4] Nettonykyarvolla laskettiin energiakustannussäästöjen nykyarvon sekä lämmityskustannusten nousun ja korkokustannusten kustannuksien nykyarvon erotus käyttäen Motiva Oy:n laskentatyökalua [5]. Laskennassa käytettiin 3 % reaalista laskentakorkoa ja 60 vuoden tarkastelujaksoa. Energian hinnannousuksi arvioitiin 2 % vuodessa. [4]

Suunnittelun ja valvonnan osuus kokonaiskustannuksista arvioitiin 10 prosenttiin. Työ- ja materiaalikustannukset laskettiin käyttäen yleisesti saatavilla olevia lähteitä, kuten Korjausrakentamisen kustannuksia 2020 ja Rakennusosien kustannuksia 2020 -kirjoja sekä tuotevalmistajien esitteistä ja suunnitteluohjeista löytyviä tietoja. Tarkemmat menetelmäkohtaiset kustannukset ovat liikesalaisuuksia, eikä niitä ole vapaasti saatavilla. [4]

Korjaustavoista laskennallisesti kannattavin oli korjaustapa 3, jossa suora takaisinmaksuaika oli noin 30 vuotta ja investointi maksaisi itsensä takaisin energian hinnannousun ja korkokulut huomioiden noin 35 vuodessa. Korjaustavoilla 1 ja 2 takaisinmaksuajat venyivät yli 55:en vuoteen jo suoralla takaisinmaksuajalla. Rakennusosien ja taloteknisten järjestelmien tekniset käyttöiät tulisivat vastaan ennen kuin alkuperäinen investointi olisi maksanut itsensä takaisin. [4]

5. Yhteenveto

Tutkituissa rakennuksissa oli useita puutteita rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyen. Nämä puutteet vaativat välitöntä korjaamista, eikä kaikkien niiden yhteydessä ollut mahdollista parantaa energiatehokkuutta. Esimerkiksi salaoja- ja sadevesijärjestelmä oli uusittava, jotta sokkelin kosteusrasitusta saataisiin vähennettyä. Näiden lisäksi kustannuksia ja siten takaisinmaksuaikaa lisäsivät peruskorjaus- ja huoltotoimenpiteet, joita oli lykätty.

Korjauksia ja niiden mahdollisia toteuttamistapoja on arvioitu kolmella eri tavalla. Näiden korjaustapojen perustana on ollut arvio kosteus- ja mikrobivaurion altistumisolosuhteista. Arvio on tehty kohteen rakenne- ja kosteusteknisen kuntotutkimuksen perusteella. Myöhemmin toteutettavien korjausten laajuus riippuu rakenteita purkaessa tai lisää tutkittaessa saatavasta lisätiedosta rakenteiden kunnosta koko rakennusryhmässä.

Uusia korjaussuunnittelussa mahdollisesti käytettäviä rakennetyyppejä ja niissä käytettäviä materiaaleja pyrittiin valitsemaan parhaan käytettävissä olevan tiedon perusteella. Niissä on huomioitu mm. muuttuvan ilmaston vaatimukset rakenteille sekä eri rakenneosien korjausten yhteensovittaminen kohteessa. Vaurioiden korjaamisen yhteyteen on liitetty vanhojen vuoden 1988 rakenneratkaisujen korjaaminen rakennefysikaalisesti toimivammiksi. Korjattavien rakenteiden pitäisi olla rakennusfysikaalisesti toimivia myös tulevaisuudessa. Olisi pyrittävä tilanteeseen, jossa kiinteistön omistajan ei tarvitse rahoittaa uutta laajaa peruskorjaushanketta edellisen hankkeen suunnitellun takaisinmaksuajan puitteissa. Investoinnin kannattavuutta laskettaessa tulee huomioida myös rakennusosien tekniset käyttöiät, jotka lopulta määrittävät investoinnin kannattavuuden pitkällä takaisinmaksuajolla.

Yksittäiset eri rakenneosia koskevat energiaremontit on saatava toimimaan yhdessä. Hankesuunnittelussa pitäisi saada sovittua yhteen kohteen korjaustarpeet, energiatehokkuuden parantaminen sekä rakennusfysikaalisesti toimiva kokonaisuus, joka olisi toimiva myös tulevaisuudessa. Kohteen hankesuunnittelu on tällä hetkellä loppusuoralla ja sen kustannuslaskennassa yhtenä vaihtoehtona on pidetty ulkoseinien tiilivuorauksen purkamista ja korvaamista puuverhouksella rakenteiden korjauksen yhteydessä.

Lähdeluettelo

- [1] RIL 250-2020. *Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen*. 2020. s.209.
- [2] Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta (2/11). 2011.
- [3] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä 4/13. 2013.
- [4] Aaro Kivelä: *Kuntotutkimus korjaussuunnittelun pohjana*. Opinnäytetyö Hämeen ammattikorkeakoulu, Hämeenlinna 2021. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202102282778>
- [5] Motiva Oy. 2021. *Laskentatyökalu energiatehokkuustoimien taloudellisen kannattavuuden tarkasteluun*. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/laskentatyokalu_energiatehokkuustoimien_taloudellisen_kannattavuuden_tarkasteluun
- [6] Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus 2021. *Energia-avustukset*. <https://www.ara.fi/energia-avustus>
- [7] Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus 2021. *Avustus kuntotutkimukseen ja perusparannuksen suunnitteluun*. https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ ja_avustukset/ Korjausavustukset/Kuntotutkimus_ ja_perusparannuksen_ suunnittelu

A7. Kosteusturvallisen rakentamisen palkinnon voittajaehdokkaat

by2020 Betonin kuivumisaika-arvio - työkalu tarkempiin arvionteihin

Pauli Sekki¹, Pasi Marttila² ja Mirva Vuori³

¹ Vahanen Rakennusfysiikka Oy

² Paju Applications

³ Suomen Betoniyhdistys ry

Tiivistelmä

Betonin kuivumisaika-arvioiden tekoon on julkaistu uusi laskentaohjelma. Ohjelmaa voidaan lisäksi hyödyntää tarkempaan kosteudenhallinnan suunnitteluun esimerkiksi päällystämisen riskiarvio- ja työmaamittausten dokumentointi ominaisuuksien avulla. *by2020 Betonin kuivumisaika-arvio* julkaistiin tammikuussa 2021, ja on otettu käyttöön usean suuren rakennusalan toimijan sekä lukuisten yksittäisten käyttäjien toimesta, joilta kerätään käyttökokemuksia ja tulevaisuudessa ohjelmaa tullaan päivittämään käyttäjien toiveet huomioiden. Tässä artikkelissa esitellään ohjelman toimintoja yleisellä tasolla sekä esimerkkien avulla.

1. Johdanto

Rakennusfysiikka 2019 seminaarissa esiteltiin [1] tavoitteita kehitteillä olleen *by2020 Betonin kuivumisaika-arvio* -ohjelman toteutukseen. Tässä esityksessä läpikäydään lyhyesti, mitä saatiin aikaan, kun ohjelma valmistui ja saatiin yleiseen käyttöön viimein tammikuussa 2021. Ohjelman toimintojen kuvaukset perustuvat ohjelman version 1.1 käyttöohjeeseen [2]. Tämän lisäksi kuvataan yleisesti ja esimerkin avulla ohjelman käyttömahdollisuuksia mm. kuivumisaajan arviointiin, päällystämisen riskiarviointiin sekä työmaalla tehtävien seurantamittausten dokumentointiin. Ohjelma on käytössä jo usealla suurella rakennusalan toimijalla sekä lukuisilla yksittäisillä käyttäjillä. Käyttökokemuksia kerätään ja ohjelmaa tullaan päivittämään käyttäjien toiveet huomioiden.

2. Betonin kuivumisaika-arvion käyttömahdollisuudet ja rajoitteet

2.1 Ohjelman käyttäjälle [2]

by 2020 Betonin kuivumisaika-arviota voidaan käyttää talonrakentamisen rakennusprojektien kosteudenhallinnan suunnitteluun ohjaamaan betoni- ja päällystemateriaalivalintoja sekä työmaan aikataulutusta ja olosuhdehallintaa. Työkaluina on betonirakenteiden kuivumisaika-arvio sekä päällystettävien rakenteiden riskiarvio. Ohjelmalla saatavan arvion perusteella ei tule tehdä päällystettävyysspäätöksiä, vaan betonirakenteen todellinen kuivuminen ja päällystettävyysspäätös edellyttävät rakennekosteusmittauksia. Ohjelmaa voidaan kuitenkin lisäksi hyödyntää työmaalla tehtävien seurantamittausten dokumentointiin tai kuivumisen edistymisen ennakkointiin vertaamalla mittausta arviioon.

Suomen Betoniyhdistys ry:n (BY) vanhassa Excel-pohjaisessa by 1021 kuivumisaika-arviossa tarkastellaan kuivumista vakiokuivumisolosuhteissa, jolloin voidaan verrata eri rakenteiden tai olosuhteiden vaikutusta arviioon. Uusi FEM-pohjainen ohjelma mahdollistaa huomattavasti monipuolisemman arvioinnin. Kuivumisaika-arvio tehdään valusta todellisen aikataulun mukaisesti, sisältäen mahdolliset pintavalut ja tasoitukset. Päällystettävyyden riskiarvioinnissa

hyödynnetään arvioitavaa kohdetta vastaavia rakenne-, olosuhde- ja aikataulutietoja sisältäen päällysteen arvioitua asennusajankohdan. Riskiarviointi tehdään tapauskohtaisesti tarkastellen päällysteen alapuolelle tasaantuvaa suhteellista kosteutta verraten pintamateriaalin kosteudensietokykyyn. Riskiarvion laskennan perusteella nähdään, miten suhteellinen kosteus uudelleen jakaantuu päällystämisen jälkeen, ja millä vaihtoehdoilla on olemassa ilmeinen riski, että kosteus päällysteen alapuolella nousee vaurioitumisen kannalta kriittisen korkeaksi. On kuitenkin ymmärrettävä, että kyseessä on arvio. Todellinen kuivumisaika sekä päällysteen alapuolinen suhteellinen kosteus voivat poiketa arviosta huomattavasti monesta eri syystä johtuen eikä vähiten betonin työmaalla toteutuneista ominaisuuksista, joita ei voida arvioida tarkasti. Päällystämisen riskiarvio tulee ymmärtää suuntaa antavana työkaluna kosteudenhallinnan suunnitteluun.

Ohjelma sisältää lisäksi toiminnot työmaalla tehtävien kosteusmittausten sekä olosuhdemittausten tallennukseen, jolloin kosteusmittauksia voidaan verrata helposti aiemmin tehtyyn arvioon. Näin ollen ohjelma on hyödynnettävissä kokonaisvaltaisesti hankesuunnittelun kuivumisaika-arvioista työmaan kosteudenhallintaan liittyvien laadunvarmistusmittausten dokumentointiin ja rakentamisen aikaiseen toimenpiteiden ohjaamiseen ja päätöksentekoon. Projektin loppudokumentointi voidaan toteuttaa esimerkiksi tulostamalla tilakohtaiset raportit työmaalla toteutuneista kosteustapahduksista ja -mittauksista.

Arvioinnin kannalta on oleellista, että ohjelman käyttäjä ymmärtää rakenteiden kosteuskäyttäytymistä, jotta hän pystyy hyödyntämään tuloksia parhaalla mahdollisella tavalla. Ohjelman käyttö ei vaadi kuitenkaan kokemusta mallinnusohjelmien käytöstä.

Ohjelmaa suositellaan hyödyntämään rakennushankkeissa kosteudenhallinnan työkaluna, tekemällä ns. herkkyysanalyysijä tarkasteltaessa eri toteutusvaihtoehtojen vaikutuksia rakenteiden kuivumiseen tietyn aikataulun puitteissa. Herkkyysanalyysissä voidaan esimerkiksi muuttaa betonilaatua tai olosuhteita, jolloin nähdään mitä suuruusluokkaa muutos kuivumisaikaan on. Päällystämisen riskiarvion herkkyysanalyysissä voidaan esimerkiksi tarkastella, miten läpäisevä pintarakenteen tulisi olla, jotta tietyllä rakenteella ja toteutusaikataululla rakenne todennäköisimmin on toimiva.

Ohjelmassa valittavana olevat betonilaadut vastaavat tällä hetkellä Suomessa käytössä olevia tavanomaisia betoneja, joissa pääasiallisena sideaineena on CEMII/B-M 42,5 sisältäen joissain tapauksissa CEM I 42,5R / 52,5R sementtejä.

Ohjelman pdf-muodossa oleva käyttöohje löytyy ohjelman asennuksen kohdekansista dokumentaation alta. On suositeltavaa, että ohjelman toimintoihin tutustutaan käyttöohjeen kautta, vaikka ohjelman info-avustekuvakkeiden avulla saakin tiedot perustoiminnoista.

2.2 Kuivumisaika-arvio, betonilaadun, rakenteen ja lämpötilan vaikutus kuivumiseen ohjelmassa

Kuivumisaika-arvio on suositeltava vaihtoehto, jos ei tiedetä tarkemmin hankkeen tai rakenneosan toteutuksen tavoiteltavaa aikataulua eikä tulevia pintarakenteita. Kuivumisaika-arvio on muussakin tapauksessa suositeltavaa tehdä ensimmäisenä tarkasteluna ennen tarkempaa päällystämisen riskiarvion tekoa.

Ohjelmaan sisällytettiin seitsemän eri betonilaatua (C25/30, v/s 0.75; C25/30, v/s 0.70; C30/37, v/s 0.65; C30/37, v/s 0.60; C25/30 NP, v/s 0.55; C35/45, v/s 0.50; C32/40, v/s 0.45). Ohjelman

kehittämisen yhteydessä tehdyissä laboratorikokeissa testattiin kolmen eri vesisementtisuhteen betonit, joiden perusteella muiden betonilaatujen ominaisuudet määritettiin. Kemiallinen kuivuminen 20 °C lämpötilassa tuottaa pinnoiltaan suljetussa tapauksessa betonilaadusta, v/s 0,45-0,75, riippuen loppukosteudet 91-97 %RH vastaavassa järjestyksessä ilmoitettuna. Laboratorikokeissa suurin vaihtelu tuloksissa oli pienen vesisideainesuhteen betonilla, jolla 9 kk testissä saavutettiin kahdella eri koesarjalla loppukosteudet ~ 85-88 %RH. Koska käytännössä on todettu, että pienen vesisideainesuhteen betoneilla ei läheskään aina saavuteta äärimmäisen tehokasta kuivumista, asetettiin ohjelmaan materiaaliarvot siten, että pienen vesisideainesuhteen betoneilla kemiallisen kuivumisen vaikutus on joihinkin tapauksiin verrattuna aliarvioitu. Tällöin ei kuitenkaan aiheuteta tilannetta, jossa ajateltaisiin pienen vesisideainesuhteen olevan niin sanotusti oikotie onnistumiseen ja erittäin nopeaan kuivumiseen. Lisäksi vastaavilla betoneilla tehdyissä kuivatuskokeissa (kappaleen yläpinta avoin) koesarjojen välillä todettiin merkittäviä eroja kuivumisen etenemisessä pidemmällä aikavälillä, mikä kertoo siitä, että betonin reseptillä ja mm. valun toteutuksella voi olla hyvin merkittävä vaikutus kuivumiseen, eikä vesisideainesuhdetta tule ajatella betonin ominaisuuksia täysin määräävänä tekijänä.

Kuivumisaika-arviossa voidaan huomioida myös tasoitteen vaikutus. Tietyissä tapauksissa tasoitteen kuivumisaikataulun arvioiminen voi olla haastavaa, ja toisaalta tasoitteiden ominaisuuksissa on niin paljon vaihtelua, että voi olla mielekkäämpää tarkastella ainoastaan betonirakenteen kuivumista. Tällöin tasoitteen vaatima kuivumisaika tulee huomioida kokonaisaikataulussa. Tasoitteen huomioiminen päällystämisen riskiarviossa on kuitenkin suositeltavaa.

Lämpötilan vaikutus kuivumiseen on määritetty kokeellisesti siten, että matalat lämpötilat hidastavat ja korkeat lämpötilat nopeuttavat kuivumista laboratorikokeissa todetussa suuruusluokassa. Lähtötietoina lämpötilan vaikutukseen käytettiin Timo Korkalan diplomityössään tuottamaa dataa [3]. On huomattava, että laskentaohjelmassa pyritään kuvaamaan betonin suhteellista kosteutta ns. referenssilämpötilassa, joka vastaa tavanomaista huoneenlämpötilaa 21 °C (vrt. näytepalakosteusmittaus). Toisin sanoen, vaikka laskennan lämpötila kuivatusjaksolla poikkeaisi referenssilämpötilasta, laskentaohjelman tulosteessa esitetty suhteellisen kosteuden arvo pyrkii kuvaamaan kosteuslukemaa 21 °C lämpötilassa. Tämä tulee huomioida esimerkiksi, jos verrataan arviota jatkuvatoimiseen seurantamittaukseen, jossa lämpötila poikkeaa merkittävästi tavanomaisesta huoneenlämpötilasta. Tällöin esimerkiksi kylmän rakenteen suhteellinen kosteus voi olla merkittävästi alhaisempi kuin arvioitu kosteus.

2.3 Päällystämisen riskiarvio

Päällystämisen riskiarviossa tarkastellaan tietyllä aikataululla tehtävää toteutusta, kun tunnetaan rakenteet ja olosuhteet. Tällöin tutkitaan, mille tasolle suhteellinen kosteus nousee käytön aikana pintamateriaalin alapuolella. Riskiä arvioidaan suhteessa päällysteen kosteudensietokykyyn. Tarkastelussa on aina suositeltavaa tehdä herkkyystarkastelu esimerkiksi seuraavien periaatteiden mukaisesti:

- Kiinnitetty aikataulu: Muuttujina käytetään kuivatusolosuhdetta sekä rakennetta
- Kiinnitetty rakenne: Muuttujina kuivatusolosuhde sekä aikataulu
- Kiinnitetty rakenne pintamateriaalia lukuun ottamatta: Edellisen lisäksi tarkastellaan eri pintamateriaalien vaikutusta

Käytännössä tulee tapauskohtaisesti pohtia hankkeessa mahdolliset vapausasteet ja tehdä herkkyystarkastelu sen mukaan.

Päällystämisen riskiarvio on tarkoitettu nimenomaan päällysteille, joiden kosteudensietokyky on rajallinen. Pinnoitteille, jotka eivät ole herkkiä kosteudelle, ei ole useinkaan tarpeen tehdä vastaavia tarkasteluja. Yleisesti ohjelman käyttäjän on syytä perehtyä päällysteiden sekä pinnoitteiden ominaisuuksiin siinä määrin, että ymmärtää pintamateriaalin asettamat kriteerit alustan kosteudelle.

2.4 Työmaamittausten dokumentointi

Ohjelmaan voidaan tallentaa rakennekosteusmittausten tuloksia sekä olosuhdetietoja. Tiedot tallennetaan ajasta riippuen laskettuna päivää valusta. Jäljempänä olevassa esimerkissä kuvataan, kuinka tiedot voidaan tuoda yksinkertaisesti kopioimalla Excelistä. Tässä ohjelmaversiossa ainoastaan rakennekosteusmittaukset tulostuvat raporttiin samaan kuvaajaan arvostelusyvyyksien ajasta riippuvassa suhteenkosteuden kanssa. Muut tiedot voi tulostaa ohjelmasta erikseen. Tiedot voidaan myös säilyttää tallentamalla malli. Alustana olevan ohjelman rajoitteista johtuen tallennus voidaan tehdä ainoastaan exe-tiedostona. Tallennettu tiedosto avautuu tallennetuilla syöttötiedoilla sisältäen laskentatulokset. Ohjelma on toteutettu siten, että laskentaa ei voi kuitenkaan tehdä uudestaan eikä syöttötietoja muuttaa, vaan ainoastaan lisätä työmaan mittaustietoja.

3. Esimerkki by2020 ohjelman käytöstä

Tarkastellaan tilannetta, jossa arvioidaan maanvastaisen betonirakenteen kuivumisaikaa sekä mahdollisia pintamateriaaliratkaisuja hankkeen tiukka aikataulu huomioiden.

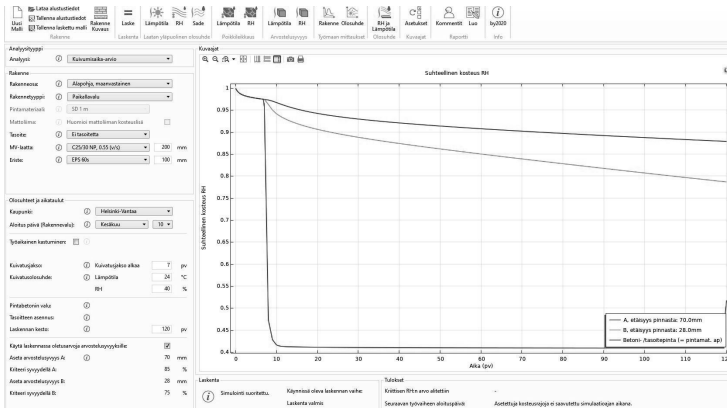
- 200 mm MV-laatta, eps 100 mm eristeellä
- Valu katon alla ja järjestetään hyvä kuivatusolosuhde 24 °C / 40 %RH
- Betonilaatu NP v/s 0.55
- Tavoitellaan päällystystä ~ 120 pv, valupäivä 10.6.2019

Kuvassa 1 on esitetty ohjelman antama kuivumisaika-arvio tilanteessa. Arvion perusteella 120 päivän tarkastelussa ei saavuteta 85 %RH kosteutta, mikä mahdollistaisi useimmat päällystevaihtoehdot. Monille päällystemateriaaleille asetettu 90 %RH kuitenkin saavutetaan. Tosin ylemmällä arviontisyvyydellä ei saavuteta kriteeriä 75 %RH.

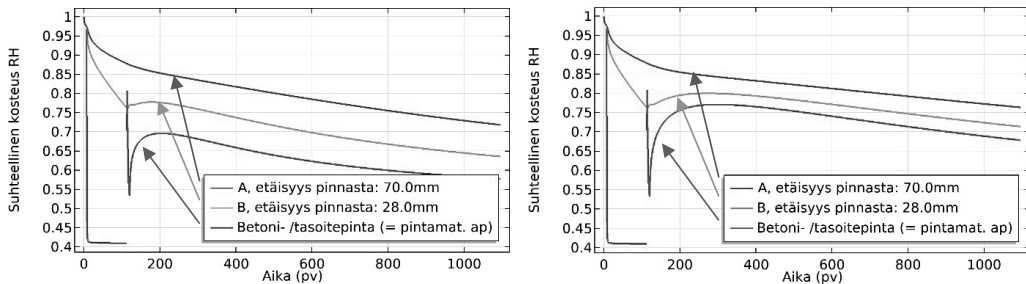
Tarkastellaan seuraavaksi mahdollisia pintamateriaalivaihtoehtoja. *Julkaisun Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen* [4] mukaan 90 %RH kriteerillä voidaan asentaa täyssynteettisiä tekstiilimattoja ilman alusrakennetta tai laattoina asennettavia tiiviitä päällysteitä. Tarkastellaan seuraavia vaihtoehtoja:

1. Tekstiilimatto, ilman alusrakennetta (herkkyystarkastelu, koska $S_d =$ arvio)
 - a. $S_d \sim 1$ m, tarraliimaus – ei huomioida liiman vaikutusta
 - b. $S_d \sim 3$ m, tarraliimaus – ei huomioida liiman vaikutusta
2. Tekstiilimattolaatta, tiivis alusrakenne (herkkyystarkastelu, koska $S_d =$ arvio)
 - a. $S_d \sim 10$ m, tarraliimaus – ei huomioida liiman vaikutusta
 - b. $S_d \sim 20$ m, tarraliimaus – ei huomioida liiman vaikutusta
3. Tekstiilimattolaatta, tiivis alusrakenne (herkkyystarkastelu, koska $S_d =$ arvio)
 - a. $S_d \sim 10$ m, liimaus kauttaaltaan – ei huomioida liiman vaikutusta
 - b. $S_d \sim 20$ m, liimaus kauttaaltaan – ei huomioida liiman vaikutusta

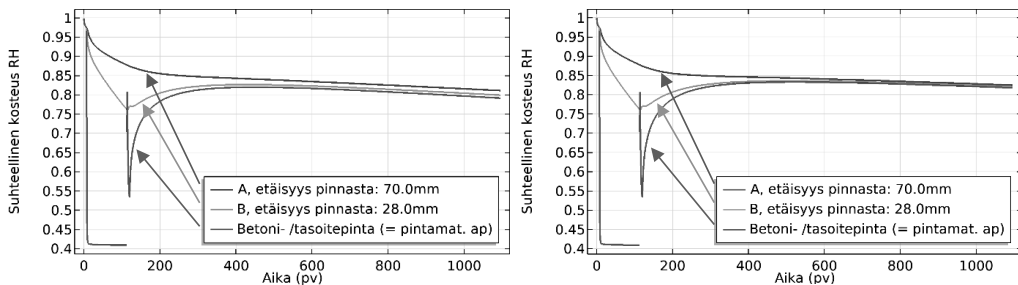
Kaikissa vaihtoehtoissa on 5 mm paksu tasoite, joka asennetaan 7 päivää ennen päällysteen asennusta. Tarkastelun kokonaiskestona on kolme vuotta. Tulokset on esitetty kuvissa 2-4.



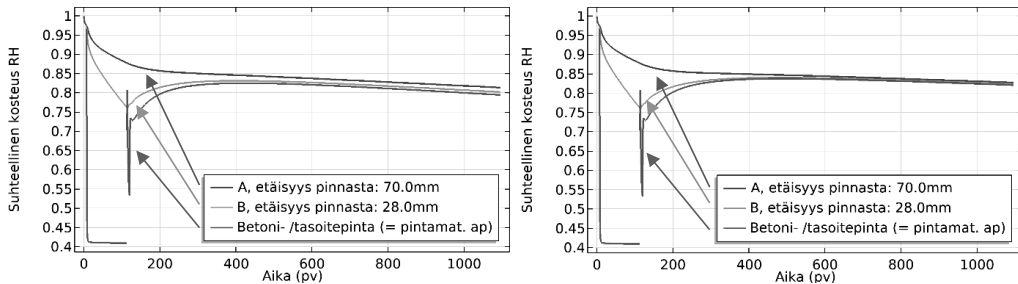
Kuva 1. Yleisnäkymä ohjelmasta. Kuvaajassa on esitettyä kuivuminen tarkasteluvyvyksillä laskentajakson 120 pv aikana.



Kuva 2. Vasemmalla tapauksen 1a ($s_D = 1\text{ m}$) laskennan tulokset, jossa päällysteen alle tasaantuva kosteus on noin 70 %RH ja oikealla tapauksessa 1b ($s_D = 3\text{ m}$) noin 77 %RH.



Kuva 3. Vasemmalla tapauksen 2a ($s_D = 10\text{ m}$) laskennan tulokset, jossa päällysteen alle tasaantuva kosteus on noin 82 %RH ja oikealla tapauksessa 2b ($s_D = 20\text{ m}$) noin 83,5 %RH.

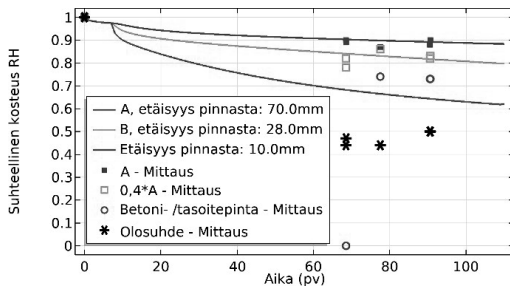


Kuva 4. Vasemmalla tapauksen 3a ($s_D = 10\text{ m} + \text{mattoliima}$) laskennan tulokset, jossa päällysteen alle tasaantuva kosteus on noin 82,5 %RH ja oikealla tapauksessa 3b ($s_D = 20\text{ m} + \text{mattoliima}$) noin 84 %RH.

Esimerkin kohteessa päädyttiin käyttämään erittäin hyvin vesihöyryä läpäisevää päällystettä, jota kuvan 1 tarkastelu edustaa, ja joissa riski on muihin vaihtoehtoihin verrattuna selkeästi vähäisin. Kohteessa oli tiiviistä aikataulusta johtuen toteutettu useita kosteusmittauksia. Alla taulukossa 1 on esitetty esimerkki työmaamittausten tulosten taulukoimiseksi ohjelmaan kopiointia varten. Arvio seurantamittausten kera on esitetty kuvassa 5.

Taulukko 1. Esimerkki työmaamittausten taulukoinnista. Toteutusaikataulu voidaan laskea Excelissä pvm. solujen erotuksena (toteutusvaiheet = valu pvm.-pv.valusta.1 ja mittauspäivät = valu pvm.-pv.valusta.2). Korostetut solut voidaan kopioida suoraan ohjelmaan.

Toteutus	pvm.	pv.valusta.1			
Valu	10.6.2019	0			
Kuivatusjakso alkaa	17.6.2019	7			
Mittaus pvm.	pv.valusta.2	70 mm	28 mm	10 mm	OS
17.8.2019 12:00	68.50	0.90	0.82	0	0.44
26.8.2019 12:00	77.50	0.87	0.86	0.74	0.44
8.9.2019 12:00	90.50	0.88	0.82	0.73	0.50



Kuva 5. Arvio ja seurantamittausten tulokset. Huom. Kuvaajan selitteessä tulisi lukea mittauksen kohdalla: Etäisyys pinnasta: 10.0 mm – Mittaus.

Esimerkin tapauksessa ei aikataulun puitteissa saavutettu B-syvyydellä kriteeriä 75 %RH, mutta käytetyllä päällysteellä riskiarvion perusteella voidaan arvioida vaurioriski vähäiseksi.

4. Yhteenvedo

by2020 Betonin kuivumisaika-arvio -ohjelma on saatu valmiiksi yleiseen käyttöön. Ohjelmaa voidaan hyödyntää kuivumisajan arvioinnin ja päällystämisen riskiarvioinnin lisäksi työmaalla tehtävien seurantamittausten dokumentointiin. Ohjelma on käytössä jo usealla suurella rakennusalan toimijalla sekä lukuisilla yksittäisillä käyttäjillä. Käyttökokemuksia kerätään ja ohjelmaa tullaan päivittämään käyttäjien toiveet huomioiden.

Lähdeluettelo

- [1] Sekki, P., Marttila, P. ja Merikallio T. 2019. ”Uusi työkalu betonilattioiden kuivumisen ja kosteusteknisen toimivuuden tarkasteluun.” Rakennusfysiikka 2019, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut: 211-216. Tampere, 2019
- [2] by 2020 Betonin kuivumisaika-arvio ver. 1.1 käyttöohje.
- [3] Korkala, T. 2018. Lämpö- ja kosteusolosuhteiden vaikutus betonin kuivumiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 164 s.

RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet uudistuu

Pekka Talaskivi¹ ja Pekka Laamanen²

¹ RIL ry

² Vahanen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisema RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet ilmestyi ensimmäisen kerran vuonna 1976. Ohje on tämän jälkeen uudistettu vuosina 1981, 1989, 2000 ja 2012 eli käsillä on nyt jo kuudes päivitys.

Ohjeen päivityksestä on vastannut RILin kokoama rakennusalaan monipuolisesti tunteva ryhmä asiantuntijoita, minkä lisäksi laajalta valtakunnalliselta lausuntokierrokselta saadut kommentit ovat antaneet arvokasta palautetietoa ohjeen viimeistelyä varten. Kuluvan vuoden loppupuolella valmistuva ohje korvaa ohjeen RIL 107-2012 ja sen käyttöönottoa suositellaan välittömästi alkavissa uudisrakennus- ja korjaushankkeissa.

1. Johdanto

Ennen RIL 107 -ohjetta on ollut käytössä Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisu A10 *Talonrakennuksen kosteus- ja vesieristystöiden normaalimääräykset* vuodelta 1948 ja se käsitti 14 sivua. RIL 107 vuodelta 1976 oli laajuudeltaan jo merkittävästi laajempi: 73 sivua. Julkaisu pysyi lähes samassa sivumäärässä päivityksissä 1981 ja 1989. Näissä ensimmäisissä julkaisuissa sisällön päähuomio kohdistui vesikattoihin. RIL 107-2000 sisälsi edeltäjiinsä nähden merkittäviä uudistuksia. Sivumäärä kasvoi 211 sivuun ja vesikattojen ohella myös muut rakennusosat ja kosteusrasitetut tilat saivat aikaisempaa selvästi enemmän sisältöä. Kirja täydentyi sisällöllisesti edelleen julkaisussa RIL 107-2012, jossa sivujen koko kasvoi ja sivumääräksi tuli 219 sivua. RIL 107 onkin kehityshistoriansa saatossa muotoutunut koko rakennusta käsittävänä ohjeena kattavimmaksi ja arvostetuimmaksi käytännön rakennusfysiikan suunnittelua Suomessa ohjaavaksi julkaisuksi.

Uudistuva RIL 107 julkaisu sisältää käytännön teknisiä ohjeita ja ratkaisuja rakennusten kosteustekniseen suunnitteluun, toteutukseen, ylläpitoon ja korjaukseen tavoitteena kosteusteknisesti varmatoimiset ja terveelliset rakennukset.

Ohje muodostaa yhdessä RILin muiden julkaisujen kanssa kattavan tietopaketin kosteuden ja rakennusfysikaalisten ilmiöiden hallintaan:

- *RIL 255 Rakennusfysiikan käsikirja* (lämmöneristys, kosteus):
Käsittelee rakennusten ja rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja teoriaa.
- *RIL 250 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen*:
Käsittelee erityisesti rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessia eri osapuolten kannalta sekä keskeisiä rakennuksen ja rakenteiden toteutusperiaatteita mikrobivaurioiden estämiseksi.
- *RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*:
Sisältää eri rakennusosien kosteusteknisiä ohjeita ja ratkaisuja.
- *RIL 126 Rakennuspohjan ja tonttialueen kuivatus*:
Käsittelee tonttialueen sekä alapohjan ja perustusten kuivatusta.
- *RIL 198 Valoläpäisevät rakenteet*:
Sisältää ohjeet valoa läpäisevien rakenteiden suunnittelua, mitoitusta, rakentamista ja huoltotöitä varten.

2. Rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyvät haasteet ovat monimutkaistuneet

RIL 107 julkaisussa esitettyjen ohjeiden ja suositusten tavoitteena on parantaa veden- ja kosteudeneristyksiin liittyvän suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon laatutasoa. Ohjeessa esitetyt toiminnalliset, rakenteelliset ja työhön liittyvät suositukset sekä tuotteilta ja tarvikkeilta edellytettävät ominaisuudet on pyritty esittämään kunkin ajanhetken parhaan tietämyksen ja hyvän rakentamistavan mukaisena.

Merkille pantavaa on, että viime vuosina rakennuksen terveellisyyteen ja rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyvät haasteet ovat monimutkaistuneet. Aikaisempia ennusteita nopeammin etenevä ilmastonmuutos, matalaenergiarakentaminen ja huonetilojen kasvavan lämpökuormituksen myötä yleistyvät jäähdytysratkaisut ovat esimerkkejä erityisesti vaipparakenteiden kosteusteknisiä olosuhteita ratkaisevasti muuttavista tekijöistä.

Ilmastonmuutoksen vaikutusten ennustetaan tuovan mukanaan märkiä syys- ja talvijaksoja, kovia tuulia ja viistosateita sekä sään ääri-ilmiöitä. Tällöin erityisesti rakenteiden kuivumiskyvyn merkitys korostuu. Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan ulkoilman olosuhteisiin seuraavasti:

- Lämpötila nousee kaikkina vuodenaikoina, talvella kuitenkin enemmän kuin kesällä.
- Suurimmat muutokset tapahtuvat syksyllä ja talvella, jolloin sataa selvästi nykyistä enemmän ja sade tulee lumen sijaan vesisateena.
- Talvella aurinkoa nähdään harvemmin, kesällä hellejaksot yleistyvät ja pidentyvät
- Kesällä keskimääräinen sademäärä ei muutu paljon, mutta rankkasateet voimistuvat, jolloin tulvat lisääntyvät.
- Tuulisuus ja pilvisuus lisääntyvät.
- Suhteellinen kosteus nousee jonkin verran.
- Vuosien välinen vaihtelu säilyy eli edelleen voi tulla kylmiä talvia ja koleita kesiä. Hyvin alhaiset lämpötilat näyttävät harvinaistuvan

Muuttuvan ilmaston myötä moni aikaisemmin hyvää rakentamistapaa edustanut rakenneratkaisu voi jälkikäteen osoittautua kosteusfysiikan näkökulmasta riskirakenteeksi, minkä vuoksi julkaisua päivitettäessä työryhmä on pyrkinyt esittämään sellaisia ohjeita ja suosituksia, jotka edistävät kosteusteknisesti entistä varmatoimisempaa ja vikasietoisempaa rakentamista.

Ohjeessa on korostettu muuttuvan ilmaston myötä esiintyvien sääilmiöiden huomioimista riittävän yksityiskohtaisella suunnittelulla sekä suunnitteluvaiheessa määriteltävien ja toteutusvaiheessa tehtävien mallitöiden, työvaihetarkastusten sekä laadunvarmistuksen merkitystä.

3. Vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017), jota kutsutaan yleisesti nimellä kosteusasetus, tuli voimaan 1.1.2018. Asetukseen liittyen on julkaistu vuonna 2020 ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, jossa taustoitetaan sekä selostetaan pykäläkohtaisesti asetuksen sisältöä. Kosteusasetuksen ohjeen punaisena lankana on pyrkimys rakenteiden vikasietoisuuteen ja samaa periaatetta on noudatettu RIL 107 päivitystä tehtäessä.

Vikasietoisuudella tarkoitetaan ratkaisuja, joissa suunnittelussa, rakentamisessa, rakennusten huollossa ja käytössä ilmenevät vähäisimmät virheet ja puutteet eivät vielä johda rakenteiden haitalliseen vaurioitumiseen. Vikasietoiset rakenteet mahdollistavat siten tiettyyn rajaan asti myös osaamattomuutta ja inhimillisiä virheitä suunnittelussa, rakentamisessa sekä rakennusten huollossa ja käytössä. Varmatoimiset ja vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin.

Suunniteltujen ja toteutettujen rakenteiden on oltava vikasietoisia siten, että ne kestävät lyhytkestoisia kosteusrasituksia vaurioitumatta. Suunnittelussa valitaan ensisijaisesti testattuja tai kokemusperäisesti toimiviksi todettuja rakenneratkaisuja ja materiaaleja. Ratkaisut, joiden toiminnasta rakennuspaikan ilmasto-olosuhteissa ei ole ennalta olemassa olevaa kokemusperäistä tietoa, osoitetaan koko rakennusosan suunnitellun käyttöiän ajan toimiviksi joko laskennallisesti tai käytännön dokumentoiduin kokein.

Kosteusteknisessä suunnittelussa tavoitellaan vikasietoisuutta mm. seuraavin keinoin:

- Valitaan teknisesti tarkoitukseensa sopivia, mutta mahdollisimman yksinkertaisia ratkaisuja, jolloin toteutuksen virheriski pienenee.
- Valitaan teknisissä ratkaisuja ja materiaaleja, joiden toimintavarmuudesta on kokemusperäistä tietoa rakennuspaikan ilmasto-olosuhteissa
- Valitaan ratkaisuja ja materiaaleja, joiden kuivumiskyky kastumisen jälkeen on mahdollisimman hyvä.
- Hallitun vuodon mahdollistavissa rakennetyypeissä, kuten esimerkiksi useimmissa ulkoseinissä, detaljisuunnittelussa varmistetaan, että tuuletusvälejä voidaan hyödyntää uloimman vaippapinnan läpi tulevien vuotovesien ulosohjauksessa rakenteen tuuletuksen ohella.
- Valitaan rakennusmateriaaleja, joiden kastuminen asennusvaiheessa on hyväksyttävää, mikäli rakennuskokonaisuuden suojaaminen sateelta on työmaavaiheessa taloudellisesti mahdotonta.
- Valitaan rakenteet, rakennustarvikkeet ja -materiaalit niin, että käytön aikana niihin joutuva kosteus ei heikennä rakenteiden ja materiaalien toimintakelpoisuutta haitallisessa määrin.
- Valitaan ratkaisuja, joiden huoltotarve on mahdollisimman vähäinen ja huoltoväli pitkä.
- Eri rakenneosien käyttöikä otetaan huomioon suunnittelussa esittämällä rakenteen huolto- ja korjausvälit tai niiden oletetaan kestävän rakennuksen suunnitellun käyttöiän ajan.
- Laitteistot, joihin liittyy vesivuodon mahdollisuus, sijoitetaan niin, että ne ovat helposti tarkastettavissa ja korjattavissa ja mahdolliset vesivuodot ja kondenssivedet ohjataan näkyville tai viemäriin.
- Teknisiä järjestelmiä suunniteltaessa tulee varmistaa, ettei niiden toimimattomuus aiheuta kosteusteknisiä ongelmia ja ettei käyttäjä pysty sulkemaan välttämättömiä järjestelmiä.

Rakennetyyppien valinnalla ja yksityiskohtien suunnittelulla on keskeinen merkitys sääsuojausmenetelmiin. Rakenne voi toimia mallinnuksen perusteella käyttötilanteessa täysin moitteettomasti. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua rakentamisen aikana puutteellisen sääsuojauksen takia rakenteisiin tunkeutunut vesi.

Lähtökohtaisesti rakenteisiin, jotka ovat toimivia mutta edellyttävät täysin virheetöntä ja täydellistä suoritusta rakennustyön aikana, tulee suhtautua varauksella. Sama pätee rakenteisiin, joiden puutteellinen huolto tai virheellinen käyttö voi vaarantaa rakenteen kosteusteknisen toiminnan.

4. Tarkennuksia sisäilman kosteuslisiin ja paine-erojen hallintaan

Rakennusten käyttöön ja asumiseen liittyvät eri toiminnot tuottavat sisäilmaan lähes aina lisäkosteutta, joka synnyttää vesihöyrypitoisuuseron sisä- ja ulkoilman välille. Kesäaikana sisäilman kosteuslisiin seurauksena suhteellinen kosteus voi ajoittain nousta 100 % RH:n arvoon käytettäessä sisäilman lämpötilana 21 °C. Tämä ilmiö lisääntyy, kun rakenteita mitoitetaan tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa rakennusfysikaalisilla testivuosilla, mikä on huomioitava rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. RIL 107 julkaisun yhteydessä on tehty pieniä tarkennuksia sisäilman kosteusluokkiin.

Taulukko 1. Sisäilman kosteuslisiin perusteella määritettyihin sisäilman kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit.

Sisäilman kosteusluokka	Kosteuslisiin mitoitussarvo talvella ($T \leq 5 \text{ °C}$)	Rakennustyyppi ³⁾
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ ¹⁾	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat ^{4), 5)} , kylmä- ja pakkahuoneet ^{4), 5)} , teollisuuden tuotantotilat, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ²⁾	Opetusrakennukset ja päiväkodit, toimisto- ja liikerakennukset, vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

¹⁾ Sisäilman kosteusluokan 1 rakennuskohteissa kosteuslisiin ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisiin voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä 6–20 g/m³.

²⁾ Sisäilman kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisiin arvoa 3 g/m³, ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisiin riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³⁾ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen sisäilman kosteusluokka voi muuttua.

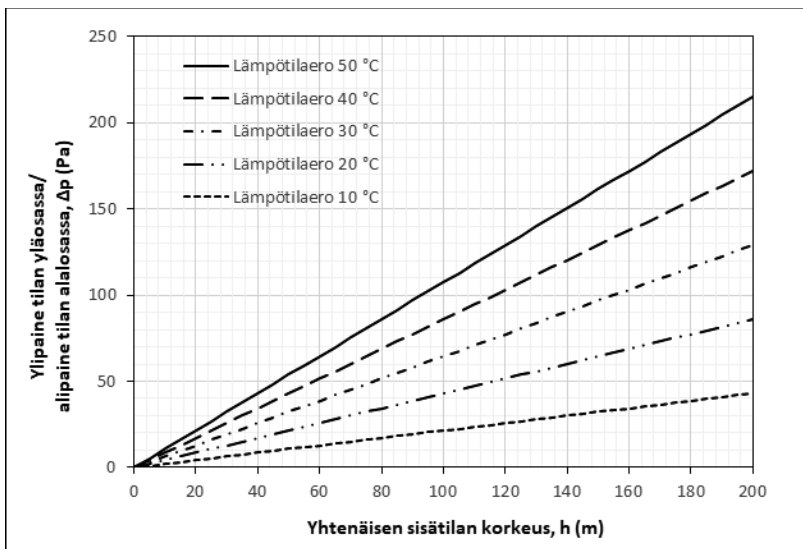
⁴⁾ Jäähdytettyjen tilojen sisäilman kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että kosteuslisiin voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

⁵⁾ Jäähdytettyjen tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Sisätiloissa, märkätiloja lukuun ottamatta, ei kesäaikaan normaalin huonelämpötilan rakennuksissa esiinny todellisuudessa kondenssia, koska jäähdytyslaite toimii osittain myös kondenssikuvaimena. Myös homeen kasvulle otollisia olosuhteita esiintyy vain hetkittäin. Ilmastonmuutoksen edetessä sisäilman suhteellista kosteutta tulee pyrkiä kesäaikaan tarvittaessa alentamaan myös erillisillä ilmankuivaimilla. Tällöin myös sisäilman mitoituskosteuslisiin on tarvittaessa alennettava vastaamaan vallitsevia sisäilman kosteusoloja.

Nykyisin uusissa rakennuksissa käytettävä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto pyritään säätämään niin, että sisätiloihin syntyy keskimäärin lähes paine-eroton tilanne tai pieni alipaine. Sisätilojen paine-erojen vaihteluväli ulkoilmaan nähden tulisi edellä mainituista syistä johtuen olla +5...-15 Pa välillä. Paine-eron haittavaikutuksia voidaan vähentää huolehtimalla tilojen osastoinnista sekä rakenteiden tiivyydestä, jolloin haitallisia ilmavirtauksia ei pääse tapahtumaan vaipparakenteiden kautta sisälle tai niiden kautta ulos.

Korkeissa rakennuksissa paine-erosta syntyy kylmänä vuodenaikana helposti haitallisia ilmavirtauksia alemmista kerroksista ylimpiin kerroksiin porrashuoneiden ja hissikulujen kautta. Myös rakennusvaipan yli vallitsevat paine-erot ovat rakennuksen ala- ja yläosissa suurempia. Tätä paine-eroa ei voida täysin hallita ilmanvaihdon avulla samalla tavalla, kuin matalissa rakennuksissa. Ilmiö on otettava huomioon rakennuksen vaipan ilmatiiveyden suunnittelussa, sekä alhaalta ylös ulottuvien kulujen suunnittelussa. Tämä merkitsee mm. sitä, että rakennuksen sisääntuloaulat, hissiaulat, porrashuoneet ja porrashuoneiden parvekkeet erotetaan väliovien sellaisiksi osastoiksi, joiden myötävaikutuksena yhtenäinen ilmavirtaus rakennuksen alaosista rakennuksen huipulle voidaan rakennuksen normaalikäytössä estää.



Kuva 1. Sisä- ja ulkoilman välisistä lämpötilaeroista johtuva paine-eron muutos tasatiiviin ulkovaipan yli yhtenäisen korkean tilan yläosassa (ylipaine sisällä) ja alaosassa (alipaine sisällä). Paine-eroissa ei ole mukana ilmanvaihdon ja tuulen vaikutusta.

5. Rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut tulee tehdä aina rakenteen suunnitellun tavoitekäyttöään pituiselle ajanjaksolle käyttäen tarkasteluissa tulevaisuuden rakennusfysikaalisia testivuosia

Ilmastonmuutos on edennyt viime vuosina nopeasti ja Suomessa on jo esiintynyt kosteusrasitusten osalta vuosia, joiden oletettiin esiintyvän vasta kuluvan vuosisadan puolivälissä. Sen vuoksi tarkemmat rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut tulee tehdä aina rakenteen suunnitellun tavoitekäyttöään pituiselle ajanjaksolle käyttäen tarkasteluissa tulevaisuuden rakennusfysikaalisia testivuosia.

Yleisesti ottaen ulkovaipan kantavat rakenteet ja lämmöneristykset tulisi suunnitella aina vähintään 50 vuoden käyttöiälle, jotta rakentamisen hiilijalanjälkeä saadaan alennettua. Pitkän käyttöiän saavuttaminen edellyttää myös sitä, että rakenteita huolletaan käytön aikana säännöllisesti.

6. Yhteenveto

RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet uudistuu. Julkaisussa esitettyjen ohjeiden ja suositusten tavoitteena on parantaa veden- ja kosteudeneristykseen liittyvän suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon laatutasoa. Alkaen vuodesta 1976 ohjeen päivitysversioissa esitetyt toiminnalliset, rakenteelliset ja työhön liittyvät suositukset sekä tuotteilta ja tarvikkeilta edellytettävät ominaisuudet on pyritty esittämään kunkin ajanhetken parhaan tietämyksen ja hyvän rakentamistavan mukaisena. Tuoreimmassa RIL 107 -päivityksessä punaisena lankana on vikasietoiset rakenteet. Tällä varaudutaan ilmastonmuutoksen rakenteisiin kohdistamiin haasteisiin. Vikasietoisuudella tarkoitetaan ratkaisuja, joissa suunnittelussa, rakentamisessa, rakennusten huollossa ja käytössä ilmenevät vähäisimmät virheet ja puutteet eivät vielä johda rakenteiden haitalliseen vaurioitumiseen. Vikasietoiset rakenteet mahdollistavat siten tiettyyn rajaan asti myös osaamattomuutta ja inhimillisiä virheitä suunnittelussa, rakentamisessa sekä rakennusten huollossa ja käytössä. Varmatoimiset ja vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin.

Kastuneen tiiliseinän kuivattaminen seinän sisään upottamalla asennetulla ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä

Esa Tommola¹, Pasi Lehtimäki¹ ja Jouko Pakkanen²

¹ SafeDrying Oy

² WildSoftware Oy

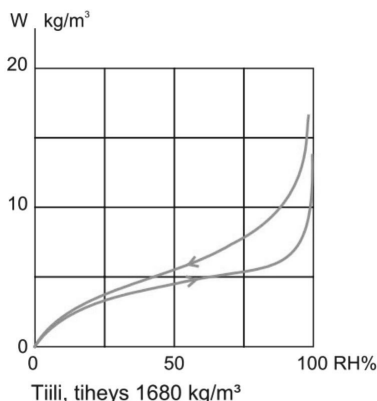
Tiivistelmä

Massiivisten tiiliseinien kuivuminen on perinteisesti ollut hidasta. Ilmastonmuutos ja viistosateiden lisäys on muuttanut ja muuttaa erityisesti Eteläisen Suomen rakennuksiin ja ulkoseiniin kohdistuvaa ulkoista kosteusrasitusta. Tästä johtuen ulkoseinille tulee jatkossa vieläkin suuremmat kosteushaasteet ja seiniin pääsevän kosteuden määrä lisääntyy voimakkaasti.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin rakenteen sisälle asennettavan ilmakiertoisen kuivatusjärjestelmän sopivuus massiivitiiliseinäisten rakennusten seinien kuivaksi saattamiseen. Tutkimuksessa keskityttiin puhtaasti kosteuden poistamiseen seinän rakenteista. Tässä tutkimuksessa ei tutkittu seinän suolojen käyttäytymistä kosteuden poistuessa eikä lähdetty arvioimaan tiilen muodon, tiilen polton, muurauslimityksen tai muurauslaastien vaikutusta kuivumiseen.

1 Johdanto

Viistosateen pystyrakenteita kastelevaa vaikutusta voidaan pitää yhtenä tärkeimpänä rakennuksen vaippaan kohdistuvana kosteusrasitustekijänä. Viistosateen merkitys on näin ollen kiistaton ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan, sekä pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Massiivisessa tiilirakenteessa kosteus siirtyy tiilen huokosrakenteesta ja laastisaumoista johtuen suhteellisen helposti ulkopinnasta kohti sisäpintaa.



Kuva 1. Tiilen (tiheys 1680 kg/m³) tasapainokosteuskäyrä [1]

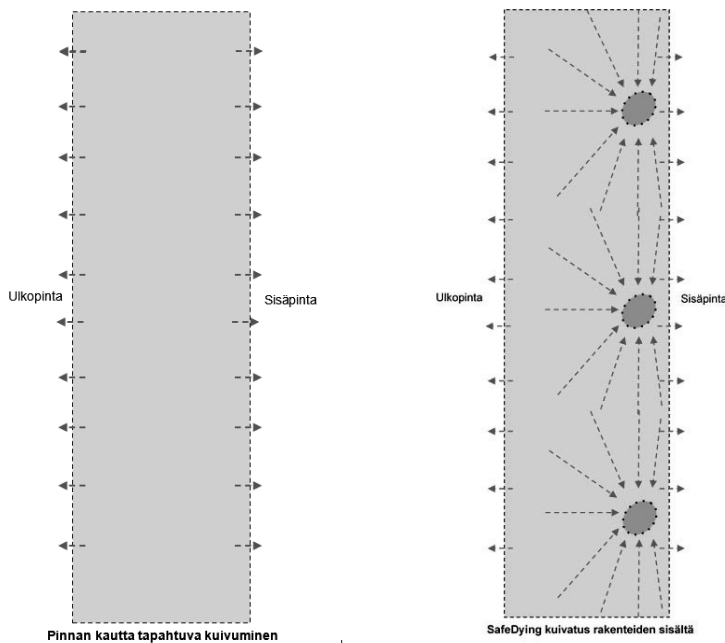
Poltettu tiili on huokoista materiaalia. Sillä on suuri kyky sitoa kosteutta vesihöyrynä kuvan 1 mukaisesti, ja imeä vettä itseensä vedenimukyvyyn ollessa 6–20 paino-% riippuen tiilen raaka-aineista ja polttoasteesta.[2]

Näistä ominaisuuksista johtuen massiivisessa täystiilirakenteessa kosteuden on mahdollista nousta rakennuksen sisäpuolella seinäpinnalla vaurioita ja sisäilmaongelmia aiheuttavalle tasolle. Tällaisen kostuneen tiilirakenteen kuivattamista lähdettiin selvittämään olemassa olevassa vanhassa tiilirunkoisessa rakennuksessa.

2 Tutkittava kohde ja koejärjestelyt

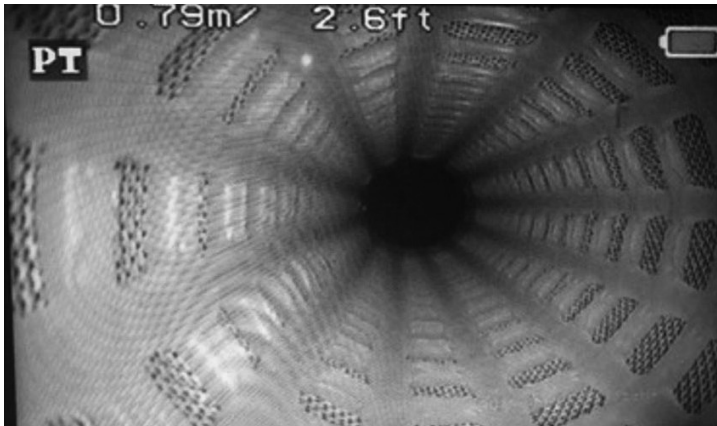
Kuivattava kohde oli 1900-luvun alkupuolella valmistunut 4-kerroksinen täystiilitalo Helsingin Eirassa n. 150 m etäisyydellä merenrannasta mäen päällä, ja oli altis meren suunnasta tuleville sateille. Kohteen seinät ovat noin 60 cm paksuja massiivitiiliseiniä. Kohteessa on ollut julkisivun rakenteissa puutteita, jonka vuoksi sade on päässyt kastelemaan osaa seinästä. Kosteusongelma oli tullut esille kiinteistön julkisivukorjauksen yhteydessä ja oli pahimmillaan etelä- ja länsiseinissä.

Tavallisesti seinärakenne kuivuu vain pintojen kautta, eli ulos- ja sisäänpäin. Koejärjestelyssä rakenteen sisälle sijoitettiin kuivatuskanavistot, jolloin kuivatuskanavistot muodostavat kolmannen kuivumissuunnan kuvan 2 mukaisesti. Tämä mahdollistaa erittäin energiatehokkaan kuivatuksen, koska kuivattava ilmatilavuus on hyvin pieni ja kanaviston muodosta johtuen siihen saadaan voimakas ilmavirtaus. Kuivatuskanaviston ollessa rakenteessa, lyhenevät diffuusiolla tapahtuvan kuivumisen kuivumismatkat joka osaltaan edesauttaa kuivumisprosessia.



Kuva 2. Kosteuden siirtymisreitit rakenteessa. Vasemmalla tilanne ilman kuivatuskanavistoa. Kuivumissuunnat sisään- ja ulospäin. Oikealla rakenteeseen upotettuna kuivatuskanavisto, joka lisää kuivatuspinta-alaa, lyhentää kosteuden siirtymismatkaa rakenteesta ulospäin muodostamalla kolmannen kuivumissuunnan kuivatuskanaviston suuntaan.

Seinän sisään upotettiin ilmakiertoinen SafeDrying- kuivatuskanavisto. Kanavisto koostuu 50 mm halkaisijaltaan olevasta rei'itetystä muoviputkesta, jonka ympärillä on siihen tarkoitukseen kehitetty kangas estämässä valun tai laastien pääsy kanaviston sisään. Kuivatusputken ulkopinnassa olevalla kankaalla on suuri merkitys kuivumiselle. Kangas muodostaa ilmavirran ja laastin tai betonin väliin hyvin epätasaisen pinnan. Tämän ansiosta kuivumispinta-ala on huomattavasti suurempi sileään pintaan verrattuna ja se puolestaan edesauttaa kosteuden siirtymistä diffuusiolla kuivattavasta materiaalista kanavistossa puhallettavaan kuivattuun ilmaan.



Kuva 3. Kuivatuskanaviston rakenne sisältä (vas.) ja ulkopuolelta (oik.).

Kokeessa kanavisto upotettiin seinään noin 20 mm syvyyteen sisäpinnasta. Kanaviston asennusura täytettiin samalla kalkki- sementti rappauslaastilla, jolla seinän sisäpinta rapattiin. Kanaviston kuivatuskanavien välinen etäisyys oli k/k n. 400–800 mm johtuen ikkunoiden ja sähköjohtojen aiheuttamasta esteistä.



Kuva 4. Kuivatuskanaviston asennusta seinään sisään

Kosteus- ja lämpötilamittauksia varten asennettiin porareikämitta-anturit 150 mm, 300 mm ja 450 mm syvyyteen seinän sisäpinnasta lukien.

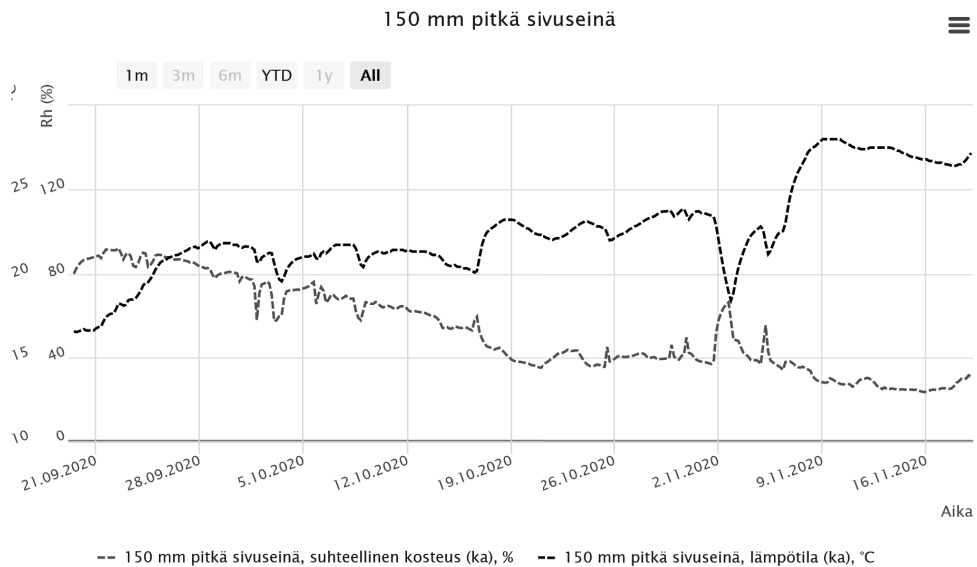
Mittauslaitteina käytettiin etäluettavia jatkuvasti mittaavia IO- living STR mitta-antureita, joiden kosteusmittauksen tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa $\pm 1,8\%$ (0–90 % RH), $\pm 2,3$ (90–100 % RH) ja lämpötilan tarkkuudeksi $\pm 0,2$ °C.

Ennen kuivatuskoejärjestelyä kastunutta seinää oli yritetty kuivattaa perinteisillä kuivatusmenetelmillä ja saunalämmittimillä, mutta niiden tulokset eivät olleet vastanneet tilaajan odotuksia kuivumisajasta. Seinään asennetuissa kuivatuskanavistoissa kierrätettiin koneellisesti puhallettua, lämmitettyä ja kuivattua ilmaa. Kanavistoon johdetun ilman lämpötila oli keskimäärin 43–50 °C ja suhteellinen kosteus 7–13 % mittaussjakson aikana.

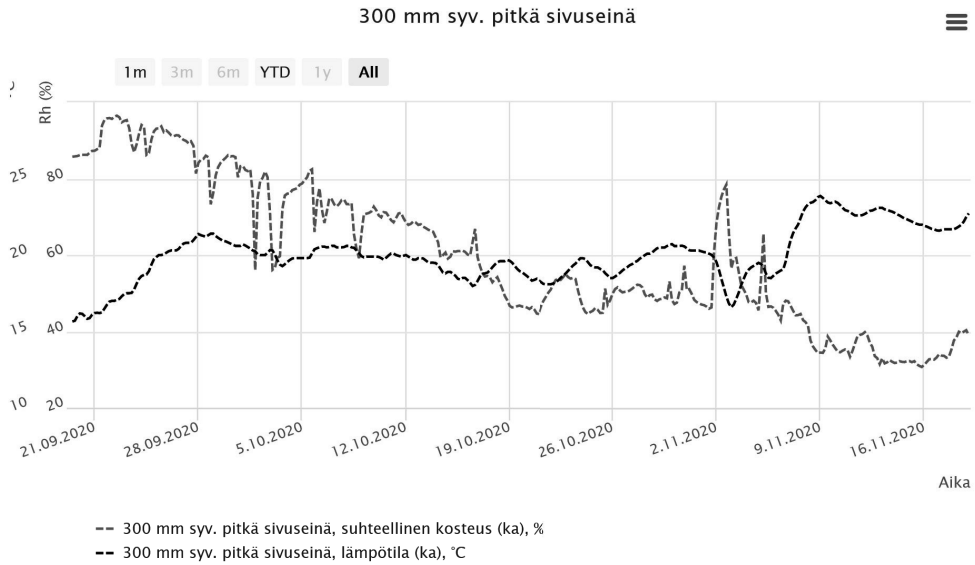
3 Tulokset

Seinän kuivatus aloitettiin 19.9.2020 ja sitä jatkettiin 8 viikkoa.

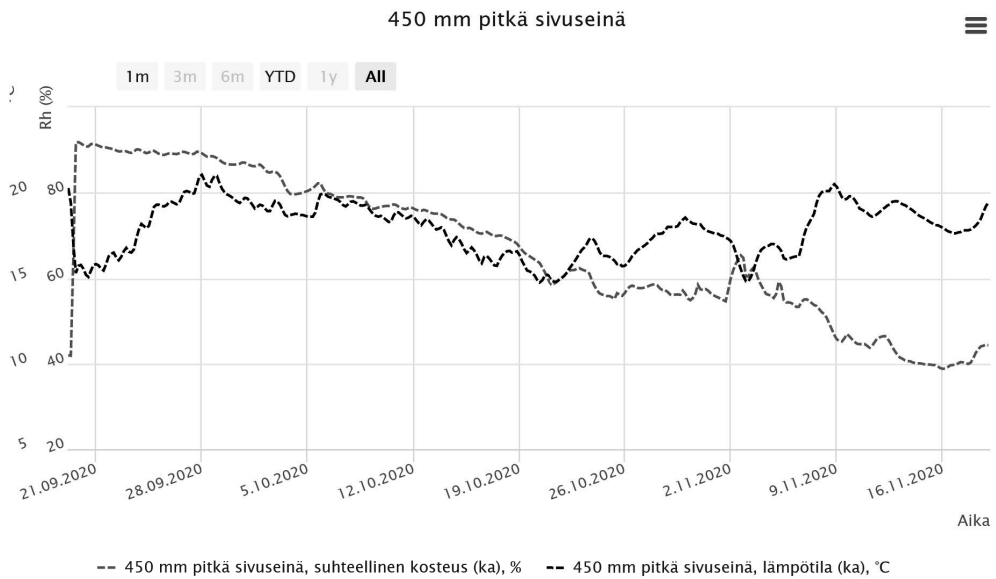
Kuvissa 5–7 on esitetty kuivumiskäyrät eri mittaussyvyyksillä. Kuivatuskanavistossa kiertävä lämmitetty ilma lämmitti rakennetta pintaosalla, jolloin lämpötila on korkeampi sisäpuolella. Kuivumista on tapahtunut kaikissa mittaussyvyyksissä. Lähtötilanteessa kosteus oli läpi koko rakenteen noin 90 % RH tasolla. Kuivatusjakson lopussa kosteus oli laskenut kuvan 8 mukaisesti noin 30–40 % RH tasolle.



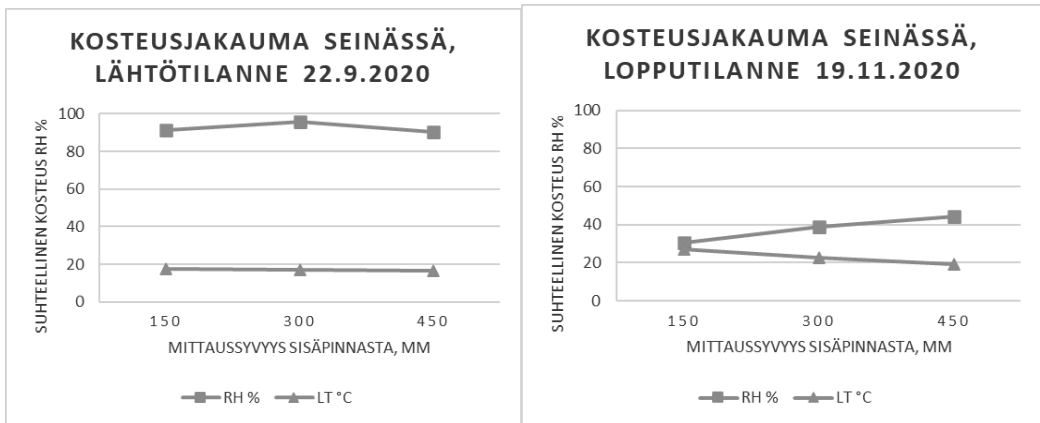
Kuva 5. Tiiliseinän kuivumiskäyrä 150 mm syvyydestä.



Kuva 6. Tiiliseinän kuivumiskäyrä 300 mm syvyydestä.



Kuva 7. Tiiliseinän kuivumiskäyrä 450 mm syvyydestä.



Kuva 8. Kosteusjakauma syvyyden funktiona, kuivatuksen alkaessa lähtötilanne ja kuivatuksen päättyessä lopputilanne.

4 Yhteenveto

Kokeen tulosten perusteella voidaan todeta, että ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä rakenteiden sisällä poisti tehokkaasti kosteutta koekohteen tiiliseinistä. Kahden kuukauden mittausjakson aikana rakenteen suhteellinen kosteus putosi noin 90 % RH tasolta noin 30–40 % RH tasolle. Kuivatuskanavisto oli asennettuna kiinteästi rakenteen sisään, jolloin rakenteen kosteuden uudelleen noudessa se on mahdollista kuivattaa uudelleen liittämällä puhalluksella, lämmityksellä ja ilmankuivaimella varustettu kuivatusyksikkö seinässä kulkeviin kanavistoihin.

Lähdeluettelo

- [1] RT 05-10710. 1999. Kosteus rakennuksissa. Rakennustieto Oy
- [2] Poltetun tiilen ominaisuudet. luettu 17.9.2021. Tiiliteollisuuden Tiili-info. <https://www.tiili-info.fi/tiili-materiaalina/poltetun-tiilen-ominaisuudet/>

Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen -ohje

Toni Mäki ja Mikko Koskivuori
Vahnen Rakennusfysiikka Oy

Tiivistelmä

Rakennusten vahinkoselvitys- ja korjausprosessia sekä vahinkokartoitusraporttien sisältövaatimuksia on aiemmin määritellyt noin 15 vuotta vanha Finanssiala ry:n yleisohje. Useat rakentamista ohjaavat säännökset sekä ohjeet ovat kuitenkin uudistuneet merkittävästi viimeisen noin 5 vuoden aikana.

Uuden *Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen* -ohjeen ensisijaisena tarkoituksena on määrittellä, miten vahingon jälkeisten selvitysten on tarkoituksenmukaista edetä korjaustarpeen riittävän tarkan määrittämisen sekä korjauksen lopputuloksen onnistumisen varmistamiseksi.

Ohjeessa kuvataan vahinkojen selvitys-/korjausprosessiin soveltuva kaksivaiheinen toimintamalli, jonka tavoitteena on varmistaa rakentamista koskevien velvoittavien asetusten ja ohjeiden vaatimustason toteutuminen sekä turvallisen ja terveellisen lopputuloksen saavuttaminen vahinkotapauksiin liittyvissä korjaushankkeissa. Prosessin eri vaiheissa käsiteltävät ja huomioitavat asiat on selostettu ohjeessa omissa luvuissaan. Ohjeen liiteasiakirjana on myös raporttimalli, joka käsittelee kootusti vahingon kartoitusvaiheessa huomioitavia seikkoja, soveltuvia tutkimusmenetelmiä sekä kartoitusraportin sisältövaatimuksia.

1. Johdanto

Suomessa tapahtuu vuosittain noin 38 000 kpl korvattavaa vuoto- ja palovahinkoa, joiden yhteenlasketut korvauskustannukset ovat noin 356 miljoonaa euroa [1]. Vahinkoja sattuu kaikenikäisissä ja -kuntoisissa sekä erilaisilla rakenneratkaisuilla toteutetuissa kohteissa. Vahingon koko voi vaihdella pienestä paikallisesta vuodosta koko rakennusta koskevaan suurvahinkoon.

Kiinteistöjen vahinkokartoitukset ovat pitkään perustuneet vakuutusyhtiökohtaisesti kilpailutettuihin puitesopimuksiin, jotka on solmittu maanlaajuisesti toimivien JVT- ja kuivausliikkeiden kanssa. Kartoitukset perustuvat tavallisesti yhteen lyhyeen kohdekäyntiin, jolloin käytävissä ovat suuntaa antavat ja rajalliset tutkimusmenetelmät. Vahinkokartoitusten perusteella tehdään vahinkojen korjauksiin ja kustannuksiin vaikuttavia päätöksiä, joten kartoitusten laadulla ja kartoitusraporttien sisällöllä on merkittävä vaikutus korjausprosessin onnistumiseen.

Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen -ohjeen [2] kirjoitustyötä käynnistettäessä oli tiedossa, että kartoitusten laadussa oli huomattavaa vaihtelua. Useissa tapauksissa vahingon syy on jäänyt epäselväksi tai vahingon vaikutuslaajuutta ei ole saatu selvitettyä riittävällä varmuudella. Myöskään kaikkia rakenteiden kuntoon ja toimintaan liittyviä seikkoja ei ole aina selvitetty riittävällä tavalla. Rakenteissa on esimerkiksi saattanut esiintyä myös erinäisiä vahinkoon liittymättömiä vaurioita, tai rakenteita on voitu toteuttaa suunnitelmista poikkeavina. Korjaustarpeen arvioinnissa ja määrittelyssä tarvittavia lähtötietoja tarkentavat mahdolliset lisäselvitys-/tutkimustarpeet ovat myös jääneet usein määrittelemättä tai yksilöimättä. Edellä mainitut seikat ovat jossain tapauksissa johtaneet muun muassa vahinkokohteiden ali-/ylikorjaamiseen tai suoranaisiin vääriin korjaustapoihin. Myöskään rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta ei ole aina selvitetty, eikä arvioitu.

Kartoitusraportin ja kartoitusten sisältövaatimuksia on aiemmin esitetty Finanssiala ry:n ohjeessa: *Rakennusten ja huoneistojen vesivuotovahinkojen tutkiminen*. Kyseinen ohje on kuitenkin jo noin 15 vuotta vanha ja useat rakentamista ohjaavat säännökset ja ohjeet ovat uudistuneet viimeisen 5 vuoden aikana [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Lisäksi vahinkojen selvitys- ja korjausprosessin toimintatavat eivät aiemmin kaikilta osin ole huomioineet rakennusalan velvoittavia asetuksia.

Vahinkoselvityksiä koskevan ohjeistuksen uudistustarpeen tunnistanut Vahinkoalan Auktorisointiryhmä VAR kutsui syksyllä 2020 koolle kiinteistö- ja rakennusalan keskeisistä toimijoista koostuvan ohjausryhmän ja käynnisti kirjoitushankkeen uudistetun ohjeen laatimiseksi. Kesäkuussa 2021 laajan lausuntokierroksen jälkeen julkaistun Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen -ohjeen kirjoitustyöstä vastasi Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Ohjausryhmään kuuluivat: Petri Mero (Finanssiala ry), Kirsi-Marja Kuusisto (Suomen JVT- ja Kuivausliikkeiden liitto ry), Kyösti Korventausta (Vahinkoalan auktorisointiryhmä), Pekka Kiho (Delete Finland Oy), Hannu Kärki (Polygon Finland Oy), Kimmo Puolakka (A-Kuivaus Oy), Tommi Arpomaa (Strong-Finland Oy), Laura Lithenius (Isännöintiliitto), Jari Virta (Kiinteistöliitto Uusimaa), Pertti Huhtanen (Taitotalo), Lari Sissala (Taitotalo), Jaana-Maria Juutila (Eurofins Expert Services Oy), Timo Lahti (Ympäristöministeriö). Ohjeen kirjoitustyöstä vastasivat Toni Mäki, Mikko Koskivuori ja Sami Niemi Vahanen Rakennusfysiikka Oy:stä.

Nyt laaditun *Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen* -ohjeen pääpaino on vahingon selvitys-/korjausprosessin määrittelyssä jakamalla prosessi kahteen osavaiheeseen: A = kartoitus ja luokittelu ja B = jatkotoimenpiteiden arviointi ja korjaustarpeen määrittäminen. Lisäksi vahinkotapauksille on luotu omat vaativuusluokat, jotka vaikuttavat prosessin etenemiseen sekä esimerkiksi suunnittelijan pätevyysvaatimukseen kussakin vahinkotapauksessa.

Prosessikaavion muodossa esitetyn toimintamallin tavoitteena on varmistaa rakentamista koskevien velvoittavien asetusten ja ohjeiden vaatimustason toteutuminen korjaushankkeissa, käsittäen myös korjausten onnistumisen todentamisen. Prosessin eri vaiheissa käsiteltävät ja huomioitavat asiat sekä eri vahinkotyyppien erityispiirteet on selostettu ohjeessa omissa luvuissaan. Prosessin kuvaamisen ohella ohje määrittelee myös eri osapuolten tehtäviä ja vastuita sekä osaamisvaatimuksia.

2. Ohjeen keskeinen sisältö

2.1 Vahingon selvitys- ja korjausprosessi

Rakentamista koskevien velvoittavien asetusten ja ohjeiden vaatimustason toteutuminen vahinkoihin liittyvissä korjaushankkeissa on varmistettu prosessikaavion muodossa esitetyllä toimintamallilla. Toimintamallilla pyritään luomaan edellytykset jatkoarvioinnin sekä päätösten kannalta riittävien ja oleellisten lähtötietojen saamiseksi. Toimintamallilla varmistutaan myös, että vahinkoselvityksen menetelmät, laajuus ja eteneminen ovat oikeassa suhteessa tarkasteltavaan vahinkoon ja sen vaatimustasoon nähden (esimerkiksi yli-/alikorjausten ehkäiseminen). Vaiheistuksesta huolimatta toimintamallissa on kuitenkin huomioitu terveydensuojelulain edellyttämä viiveetön eteneminen terveyshaittaa rajoittavien tai poistavien toimenpiteiden suorittamiseksi, jolloin prosessin eri vaiheet voivat osin limittyä ja niiden sisältö tulee mieltää sujuvan etenemisen aikana arvioitaviksi aihealueiksi.

Prosessin eteneminen on riippuvainen vahingon vaativuusluokasta. Vaativien ja poikkeuksellisen vaativien vahinkotapausten osalta prosessi etenee kaksivaiheisena (vaiheet A ja B). Vaatavuusluokaltaan vähäiseksi luokiteltujen tapausten osalta toimintamalli etenee yksivaiheisena (vaihe A). Esiintyvyydeltään yleisimpien vähäisten vahinkojen tapauksessa pyritään siis lisäksi

varmistamaan prosessin mahdollisimman nopea eteneminen vahinkotapahtumasta korjaustoimenpiteisiin.

Vahingon luokittelu tapahtuu kartoitusvaiheessa kerättyjen lähtötietojen arvioinnin perusteella. Vahingon luokittelussa määritellään vahingon vaativuusaste luokittelukriteeristön mukaisesti. Luokittelukriteeristön taustalla on asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määrittelystä sekä kyseisen asetuksen soveltamisohje YM1/601/2015 [10]. *Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen* -ohjeen sisällössä on erilliset luvut, jotka kuvaavat esimerkiksi vahingon luokittelijalta edellytetyjä osaamisvaatimuksia sekä luokittelukriteeristöä.

Luokituksestaan vaativissa ja poikkeuksellisen vaativissa tapauksissa arvioidaan luokituksen jälkeen (vaihe B) lähtötietojen riittävyttä ja määritellään vahingosta aiheutunut sekä mahdollinen vahinkoon liittymätön korjaustarve tai mahdolliset jatkotutkimustarpeet korjaustarpeen selvittämiseksi. Mahdollinen suunnittelutarve arvioidaan aina tapauskohtaisesti. Vaiheen B tehtävät suoritetaan vahingon vaativuusluokkaan nähden riittävän pätevän asiantuntijan toimesta. Vahingon korjausprosessin eri vaiheet on kuvattu erillisessä kaaviossa.

22 Osaamisvaatimukset

Ohjeessa on määritelty vahinkoselvityksiin osallistuvien henkilöiden osaamisvaatimuksia vahingon kartoituksia ja luokittelua sekä jatkotoimenpiteiden määrittämistä, tutkimuksia ja korjaussuunnittelua suorittavien henkilöiden osalta.

Vahingon kartoituksesta laadittavan raportin tarkoituksena on tarjota riittävät pohjatiedot vahingon luokittelun ja jatkotoimenpiteiden määrittämisen näkökulmasta, joten vahinkokartoituksia suorittavilta henkilöiltä edellytetään perehtyneisyyttä rakennustekniikkaan ja rakennusfysiikan perusteisiin sekä näiden tietojen soveltamiskykyä vahinkotapausten/-kohteiden erityispiirteet huomioiden. Vastaavaa osaamista edellytetään vahinkojen luokittelua suorittavilta henkilöiltä, koska vahingon vaativuusluokan arvioinnin ohella luokittelijan on osattava arvioida myös tehtyjen kartoitusten laatua ja raportissa esitettyjen korjaussuosittelusten sisältöä.

Vahingon luokittelijan osaaminen korostuu erityisesti esiintyvyydeltään yleisimpien ja vaativuusluokaltaan vähäisissä vahinkotapauksissa, joissa toimenpiteet käynnistetään pääosin kartoitusraportin suositusten ja luokittelijan määrittelemänä. Vastaavasti luokittelijan on myös tunnistettava lukuisten vahinkojen joukosta erityismenettelyä, kuten jatkotutkimuksia tai asiantuntija-arviointia edellyttävät tapaukset.

Vaativuusluokaltaan vaativiksi tai poikkeuksellisen vaativiksi tunnistettujen vahinkotapausten jatkotoimenpiteiden määrittämisen, tutkimusten ja korjaussuunnittelun pätevyysvaatimusten osalta noudatetaan Ympäristöministeriön ohje rakennusten suunnittelijoiden kelpoisuudesta - julkaisun [11] kelpoisuusvaatimuksia huomioiden riittävä pätevyys mahdollisten terveyshaittaa aiheuttavien tekijöiden selvittämiseksi. Vahinkotapausten kiireellisestä luonteesta johtuen onkin suositeltavaa, että riittävän pätevyyden omaava asiantuntija kiinnitetään kohteeseen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa korjaustarveselvitysten toteutusta.

23 Vahingon kartoitus ja raporttimalli

Vahingon kartoitus on vahinkoprosessin etenemisen kannalta keskeisin osavaihe, koska jatkovaiheita koskevat päätökset perustuvat pääosin kartoitusraportin sisältöön.

Vahinkotapahtumien luonteesta johtuen on kuitenkin tyypillistä, että kartoitus toteutetaan lyhyellä

varoitussajalla ja yhdellä kohdekäynnillä, jolloin kartoittajan suorittama laajuusarviointi perustuu lähinnä suuntaa antaviin ja rajallisiin tutkimusmenetelmiin.

Vaikutuslaajuudeltaan pienissä ja helposti rajattavissa vahinkotapauksissa yhdellä lyhyellä kartoituskäynnillä voidaan yleensä saavuttaa riittävät tiedot vahingon edellyttämien toimenpiteiden määrittelyyn ja käynnistämiseen. Tällöin mahdollisia vähäiseksi tulkittuja lisäselvityksiä voidaan tarvittaessa toteuttaa myös purkutöiden yhteydessä. Sen sijaan vaativuusluokituksestaan vaativissa tai poikkeuksellisen vaativissa vahinkotapauksissa korjaustarpeen selvittämiseksi tarvitaan usein täsmällisempiä lisätutkimuksia. Kartoitusraportin tuleekin aina tarjota riittävät pohjatiedot erityisesti vahingon vaativuusluokittelun ja mahdollisten lisätutkimustarpeiden arvioinnin näkökulmasta.

Ohjeessa selostetaan yleisellä ja periaatteellisella tasolla vahingon kartoitusvaiheen tarkoitus, tavoitteet sekä keskeiset tehtävät, kuten lähtötietojen oikeellisuuden todentaminen, vahingon syyn selvittäminen ja dokumentointi, rakenteiden toteutustavan selvittäminen ja veden kulkureittien arviointi, vahingon alustava laajuuden ja toimenpidesuosituksen määrittely, mahdollisten lisävaurioita ehkäisevien välittömien toimenpiteiden arviointi.

Ohjeen liitteenä on myös raporttimalli, jossa kuvattu kartoitusraportin ohjeellinen rakenne on vaiheistettu vahinkokartoituksen johdonmukaisen etenemisjärjestyksen mukaisesti. Kartoitusraportin sisältövaatimusten ohella raporttimallissa on esitetty kootusti muun muassa kartoituskäynnillä huomioitavia seikkoja sekä kartoituskäynnin luonteeseen soveltuvia tutkimusmenetelmiä.

2.4 Vahingon luokittelukriteerit ja luokittelu

Ohjeessa esitetty vahinkotapausten vaativuusluokitus (vähäinen, vaativa, poikkeuksellisen vaativa) mukailee Valtioneuvoston asetusta rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määrittämisestä 214/2015 [9] ja luokittelukriteeristön taustalla on asetuksen soveltamisohje YM1/601/2015 [10]. Vahingon luokittelu tehdään kartoitusraportissa esitettyjen lähtötietojen perusteella.

Ohjeessa vähäisellä vahingolla viitataan tilanteeseen, jossa vahingosta aiheutunut rakenteiden kastuminen ei ole johtanut materiaalien laaja-alaiseen vaurioitumiseen ja vahingon edellyttämät toimenpiteet voidaan käynnistää kartoitusraportin suositusten ja luokittelijan määrittelemänä (perusteet arvioitu riittäviksi). Nämä ovat esiintyvyydeltään yleisimpiä (massavahingot) vahinkotapauksia, joissa nykyisen vakiintuneen menettelyn (yksivaiheinen) on arvioitu olevan pääosin riittävä etenemistapa. Rakennusfysiikan ja kosteusvauriokorjauksen osalta ei kuitenkaan määritetä vähäistä suunnittelutehtävää. Näin ollen vaativuusluokittelun tarkoituksena onkin tunnistaa vahinkojen joukosta erityishuomiota edellyttävät tapaukset, joihin ei voida soveltaa asetusten/ohjeiden puitteissa yksivaiheista menettelyä.

Vähäisten vahinkojen tunnusmerkistöä ovat muun muassa:

- Vahingosta aiheutuva toimenpidetarve koskee pääosin pintarakenteita.
- Vahingon syntymissyyt sekä vedenkulkeutumisreitit ovat tiedossa ja vahingon vaikutusalue mitä ilmeisemmin luotettavasti rajattavissa.
- Vahingosta aiheutunut rakenteiden kastuminen ei ole johtanut materiaalien laaja-alaiseen vaurioitumiseen.

Luokituksestaan vaativien vahinkojen tunnusmerkistöä ovat muun muassa:

- Vahinko on vähäistä laaja-alaisempi.
- Vahinko koskee rakennusfysikaaliselta toiminnaltaan vaativia rakenteita.
- Korjaustarpeen, rakenteiden kastumislajuuden ja veden kulkeutumisreittien selvittämiseksi on tarpeen toteuttaa lisätutkimuksia (vrt. vähäinen).

Poikkeuksellisen vaativissa vahingoissa tunnusmerkistöä ovat muun muassa:

- Laaja-alaiset vahingosta riippumattomat kosteus- ja homevauriot.
- Merkittävät rakennuksen terveellisyyteen liittyvät arviointi-/suunnittelutarpeet.
- Laajat tutkimustarpeet.
- Tarve poikkeuksellisille suunnitteluratkaisuille, joille ei ole valmiita suunnitteluohjeita.

25 Korjaustarpeen selvittäminen ja korjaussuunnittelu

Pääperiaatteena vahinkotapauksiin liittyvässä korjaussuunnittelussa on rakenteiden ennallistaminen vahinkoa edeltävään tilaan. Erityisesti iäkkäissä kohteissa rakenneratkaisuissa saattaa kuitenkin ilmetä rakenteiden toteutustapaan liittyviä toiminnallisia puutteita ja vahingosta riippumattomia korjaustarpeita, jotka eivät mahdollista ennallistavaa korjausta. Tällaisten kohdekohtaisten erityispiirteiden tunnistaminen mahdollisen aikaisessa vaiheessa on erittäin tärkeää, jotta vahinkoprosessi ohjautuu jo lähtötilanteessa lopputuloksen onnistumisen kannalta tarkoituksenmukaiseen suuntaan. Vahingosta riippumattomien korjaustarpeiden tai esimerkiksi rakenteiden toteutustapaan liittyvien puutteiden aikainen tunnistaminen on tärkeää myös siitä syystä, että vahinkotapauksissa vakuutusyhtiön korvaamat korjaustyöt rajoittuvat lähtökohtaisesti vain vahingosta aiheutuneisiin korjaus- tai muutostarpeisiin. Vahinkoprosessin eri vaiheissa onkin aina muistettava huomioida rakennushankkeeseen ryhtyvän (kiinteistön omistaja) rooli korjausten sisällöstä ja eri korjausvaihtoehdoista päätettäessä.

Vaativiksi tai poikkeuksellisen vaativiksi tunnistetuissa vahinkotapauksissa vahinkoprosessi etenee kartoituksen ja luokittelun jälkeen korjaustarveselvitysvaiheeseen, jolla varmistetaan, että kohteesta on olemassa riittävästi korjaussuunnittelussa tarvittavia tietoja. Lähtötietojen riittävydestä vastaa kohteeseen nimetty suunnittelija, joka ohjaa/määrittelee osaltaan täsmäntävien tutkimusten sisältöä. Mahdollisten suunnitteluasiakirjojen tarve arvioidaan, ja esimerkiksi hankkeen lupakynnyksen ylittyminen selvitetään aina suunnittelijan toimesta tapauskohtaisesti. Ohjeen sisällössä on korostettu vahinkokohteiden korjaustarpeen selvittämisessä, korjaussuunnittelussa sekä korjaustöiden onnistumisen todentamisessa huomioitavia seikkoja.

26 Korjaustöiden suorittaminen

Vahingon korjausprosessi käynnistetään vahingon vaativuusluokituksesta ja mahdollisista lisätutkimus-/suunnittelutarpeista riippuen mahdollisimman viiveettömästi vahingon kartoituksen jälkeen. Ohjeen sisältöön on koottu vahinkotapausten korjaustöiden eri vaiheiden keskeistä sisältöä, menettelytapoja ja aihetta koskevaa lainsäädäntöä. Luvuissa tarkastellaan vahinkokohteiden näkökulmasta muun muassa korjaushankkeen purkutyövaihetta, rakenteiden desinfiointitarpeen arviointia, puhtaudenthallintaa, haitta-aineita ja asbestia sekä rakenteiden kuivausta, ennallistamista ja korjausten onnistumisen todentamista.

27 Vahinkotyyppien erityispiirteitä

Ohjeen pääpaino on lukumäärällisesti yleisimpien ja vaikutuksiltaan vähäisten vesivahinkojen selvitys- ja korjausprosessin kuvaamisessa. Ohjeen sisältöön katsottiin kuitenkin tarpeelliseksi koota erillinen luku, jossa käsitellään erilaisten vahinkotyyppien erityispiirteitä. Esimerkiksi viemärivuodoissa veden sisältämät epäpuhtaudet edellyttävät varsinkin jälkivahinkojen torjuntavaiheessa tavanomaisista vuotovahingoista poikkeavia menettelytapoja, joilla on vaikutusta myös rakenteiden korjaustarpeen arviointiin ja määrittelyyn. Palovahinkojen erityispiirteitä ovat muun muassa tulipalon lämpörasituksen aiheuttamien rakenteellisten vaurioiden tutkiminen, savu- ja nokivaurioiden laajuuden kartoittaminen ja puhdistettavuuden arviointi sekä sammutusvesien leviämisreittien selvittäminen. Lisäksi ohjeen sisällössä on käsitelty taloudellisilta vaikutuksiltaan laajojen suurvahinkojen ja rakennusaikana tapahtuneiden vahinkojen selvitys- ja korjausprosessissa huomioitavia seikkoja.

3. Yhteenvedo

Uusi *Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen* -ohje on julkaistu kesäkuussa 2021. Ohjeessa määritellään, miten vahingon jälkeisten selvitysten on tarkoituksenmukaista edetä. Ohjeessa kuvataan vahinkojen selvitys-/korjausprosessiin soveltuva kaksivaiheinen toimintamalli, jonka tavoitteena on varmistaa rakentamista koskevien velvoittavien asetusten ja ohjeiden vaatimustason toteutuminen sekä turvallisen ja terveellisen lopputuloksen saavuttaminen vahinkotapauksiin liittyvissä korjaushankkeissa. Vahinkoprosessin eri vaiheissa käsiteltävät ja huomioitavat asiat sekä eri vahinkotyyppien erityispiirteet on selostettu ohjeessa omissa luvuissaan. Ohjeen liiteasiakirjana on raporttimalli, joka käsittelee kootusti vahingon kartoitusvaiheessa huomioitavia seikkoja, soveltuvia tutkimusmenetelmiä sekä kartoitusraportin sisältövaatimuksia.

Lähdeluettelo

- [1] Finanssiala ry. Verkkomateriaali. <https://www.finanssiala.fi/aiheet/tilastot/>
- [2] Rakennusten vahinkoselvitykset ja korjaaminen, 2021. Vahinkoalan Auktorisointiryhmä VAR.
- [3] Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016, Ympäristöministeriö.
- [4] Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus, Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18.
- [5] 782/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta.
- [6] Rakennusten kosteustekninen toimivuus, Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, 2020.
- [7] 545/2015 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.
- [8] Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, Osat I-V, Valvira.
- [9] 214/2015 Valtioneuvoston asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määrittämisestä.
- [10] YM1/601/2015 Ympäristöministeriön ohje rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokista.
- [11] YM2/601/2015 Ympäristöministeriön ohje rakennusten suunnittelijoiden kelpoisuudesta.

MATolog mittausteknologia rakenteiden jatkuvatoimisessa mittauksessa

Marko Oikarinen, Janne Liponen, Jaakko Ala-Paavola ja Samuel Aulanko
Mato Engineering Oy

Tiivistelmä

Mato Engineering Oy on kehittänyt uutta mittausteknologiaa rakenteiden mittaamiseen vuodesta 2017 lähtien. Tässä artikkelissa esitetään eri pilottihankkeista saatuja tuloksia, joiden perusteella mittausteknologia nyt myös kaupallistetaan. Teknologian avulla rakennustyömaan kuivattaminen nopeutuu. Kosteudenhallinta tulee näkyväksi jo valun yhteydessä ja kuivattaminen voidaan aloittaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Tarvittavat kuivatus-/lämmitystoimenpiteet kohdistetaan hallitusti alueille, jotka tarvitsevat tehostettua kuivatusta, näin säästyy energiaa ja kuivattamiseen tarvittava aika vähenee. Uusi mittausteknologia mahdollistaa jatkuvan kosteuden mittaamisen rakenteiden sisältä, myös betonivalusta. Perinteisten mittausmenetelmien rajoittuneisuus (kondensoituminen, ”ryökiminen”...) on estänyt jatkuvat mittaukset rakenteista tai tiloista, joissa esiintyy kondensoitumista tai kemikaaleja. Teknologia on tarkoitettu tarkkaan mittaukseen ja tulokset ovat reaaliaikaisesti saatavilla erilaisiin tietojärjestelmiin. Pilottihankkeista saadun kokemuksen perusteella antureiden asentaminen vaatii asentajien järjestelmällisen koulutuksen ja sertifiointin.

1. Johdanto

Rakentamisen aikainen kosteudenhallinta on tärkeä osa koko rakennuksen elinkaaren aikaista kosteudenhallintaa. Kuivaketju 10 on toimintamalli, jolla vähennetään kosteusvaurioiden riskiä koko rakennuksen elinkaaren ajalta. Tarkoituksena on torjua kosteusriskiä jokaisessa työvaiheessa ja todentaa se luotettavalla tavalla. Todentamiseen kuuluu erilaisia tilojen ja rakenteiden kosteusmittauksia. Tällä hetkellä rakenteiden mittaukset ovat kertaluonteisia ja markkinoilla ei ole ollut tarkkoja jatkuvatoimisia mittauksia, joiden avulla rakenteiden kosteutta voidaan tarkkailla eri rakennusvaiheissa sekä rakennuksen käytön aikana [3].

Yleisin betonin kosteuden määrittämiseen käytetty menetelmä Suomessa on porareikämittaus ja toinen standardimenetelmä on näytepalamittaus. Molemmat menetelmät ovat kertaluonteisia mittauksia ja antavat tietoa vain sen hetkisestä kosteustasosta [1][2]. Rakentamisen aikana olosuhteet vaihtuvat ympäristön olosuhteiden muuttuessa sekä eri rakennusvaiheissa kuten esim. lämmitettäessä rakenteita tai rakennuksen tiloja. Kiinnostavaa onkin seurata kosteuden suuntaa ja suuruutta rakenteissa jatkuvatoimisesti betonivalun ensi hetkestä alkaen.

Vuodesta 2017 kehitetty Matolog mittausteknologia poikkeaa täysin nykyisistä mittausmenetelmistä. Perinteisillä mittausteknologioilla päästään kiinni valun kuivumisen mittaamiseen vasta kuukausien jälkeen valusta. CURE betonianturilla voidaan mitata ja analysoida jatkuvatoimisesti betonin olosuhteita aina valun alkuhetkestä kiinteistön käyttöönottoon asti sekä myös sen jälkeen

Matolog BOX on olosuhteanturi, jolla olosuhteita voidaan seurata tiloista sekä kiinteiden rakenteiden sisältä kuten esim., seinärakenteet, eristykset sekä ylä- ja alapohjat. Yhdessä MATolog CURE ja BOX anturit mahdollistavat jatkuvatoimisen kosteudenhallinnan rakentamisen eri vaiheiden sekä rakennuksen käytön aikana.

2. Mittausteknologia

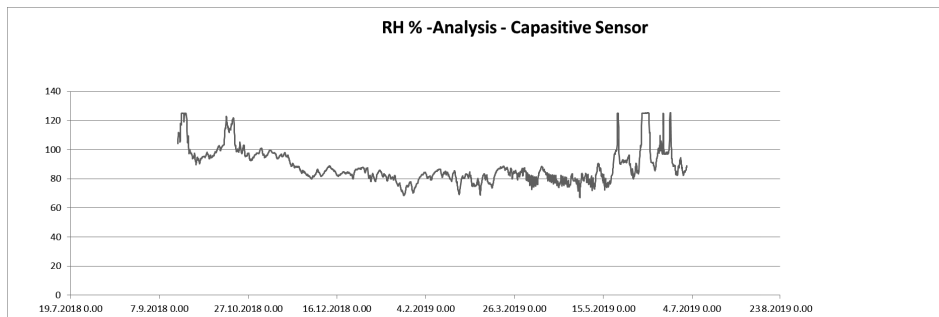
MATolog mittausteknologialla mitataan lämpötilaa, suhteellista kosteutta sekä kapillaaripainetta. Anturi on yhdistelmä elektroniikkaa ja materiaalitekniikkaa. Anturin mittausten menetelmänä on piezoresistiivinen anturi yhdistettynä Matologin kehittämään anturirakenteeseen. Mittausmenetelmä mahdollistaa jatkuvan mittauksen rakenteista ja se on tarkoitettu tarkkaan mittaukseen. Mittausjärjestelmä koostuu langattomista MATolog CURE ja MATolog Box antureista sekä tiedonsiirrosta radioteknologian avulla.

2.1 Perinteisten työmaamittausteknologioiden ongelmat

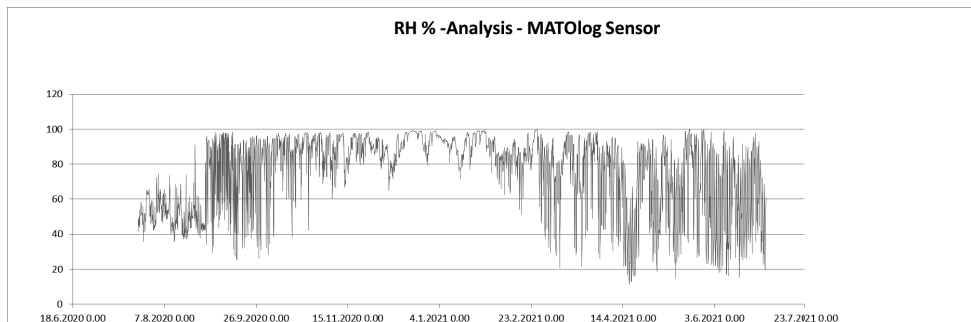
Tällä hetkellä käytössä olevat mittausten menetelmät mahdollistavat rakenteiden sisältä ainoastaan kertaluoteiset mittaukset ja jatkuvatoimista mittauksista ei ole voitu luotettavasti käyttää johtuen käytettyjen anturitekniikoiden rajoitteista [1][2].

2.1.1 Kondenssi

Yksi merkittävin ongelma perinteisille mittalaitteille on anturin mittapään kondensoituminen käytön aikana. Kondensoitumisesta aiheutuu välitön kalibrointitarve ja mittalaitteen tarkkuus heikkenee merkittävästi [1][2]. Pitkäkestoisten kenttäkokeiden avulla on selvitetty antureiden käyttäytymistä vaihtuvissa olosuhteissa. MATolog -anturit vastustavat kondenssin muodostumista mittapäällä.



Kuva 1. Kapasitiivisen anturin käyttäytyminen kiinteistön alapohjassa yhden vuoden aikana. Tilassa tapahtuu kondensoitumista. Kondensoituminen näkyy yli 100 %:n arvojen ylittymisenä.



Kuva 2. MATolog BOX anturin käyttäytyminen ulko-olosuhteissa yhden vuoden aikana. 100 %:n ylitystä (RH) ei tapahdu.

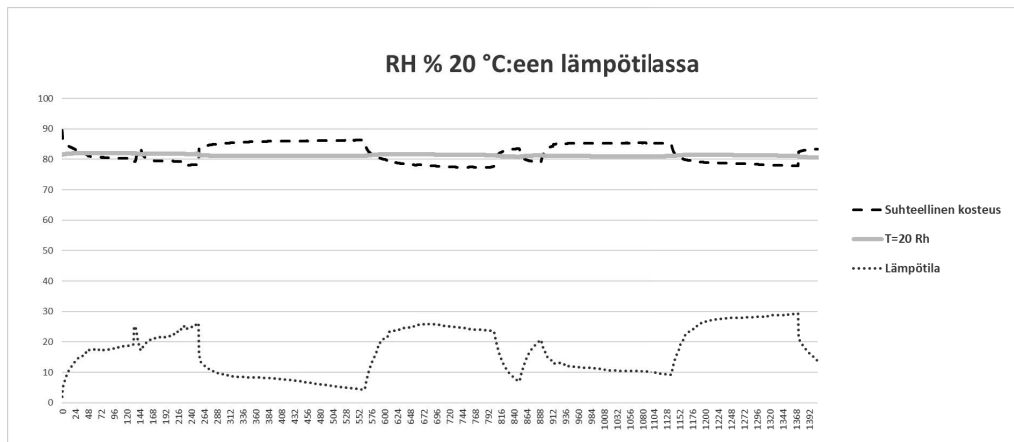
2.1.2 Jatkuva mittaus

Perinteiset mittalaitteet ovat herkkiä reagoimaan ympäristön olosuhteisiin. Kapasitiivisen anturin kapasitanssi muuttuu rakenteessa mahdollisesti olevien kemikaalien vaikutuksesta, vaikka varsinaista muutosta veden määrässä rakenteessa ei tapahdu. Tästä seuraa myös kosteuslukemien muuttuminen. Tätä ilmiötä alalla kutsutaan ”ryömimiseksi”[1][2]. Ilmiöstä johtuen mittaus on ollut mahdollista tehdä vaativissa rakenteissa kuten betonissa vain kertaluonteisena mittauksena.

2.1.3 Mittausepävarmuus

Porareikämenetelmän luotettavuus on riippuvainen rakenteen lämpötilasta ja hyväksyttävän mittauslämpötilan tulee olla alueella $20 \pm 5 \text{ °C}$ [1].

Jatkuvan mittauksen mahdollistuessa myös tuloksien tulkinnasta tulee helpompaa. Yksittäiset suurten lämpötilojen aiheuttaman vaihtelut voidaan eliminoida tulosten tarkastelussa pois. Tulosten ilmoittaminen esim. 20 °C :ssa tulee myös mahdolliseksi. Matologin jatkuvalla mittauksella voidaan mitata myös kosteuslukemia $0\text{--}15 \text{ °C}$:een välillä tai yli 25 °C :een lämpötiloissa.



Kuva 3. Tulokset voidaan ilmoittaa 20 °C :een lämpötilassa, kun tasapainokäyrä on saavuttanut kalibrointitason

MATolog -anturilla ei ole itse mittaustapahtumaan liittyviä virhelähteitä mikä on taas porareikä- ja näytepalamenetelmässä varsin suuri virhelähde [1][2]. Matologin suurin epävarmuus liittyy anturin sijaintiin rakenteessa, minkä takia asentajien tulee olla koulutettuja ja sertifioituja asentajia.

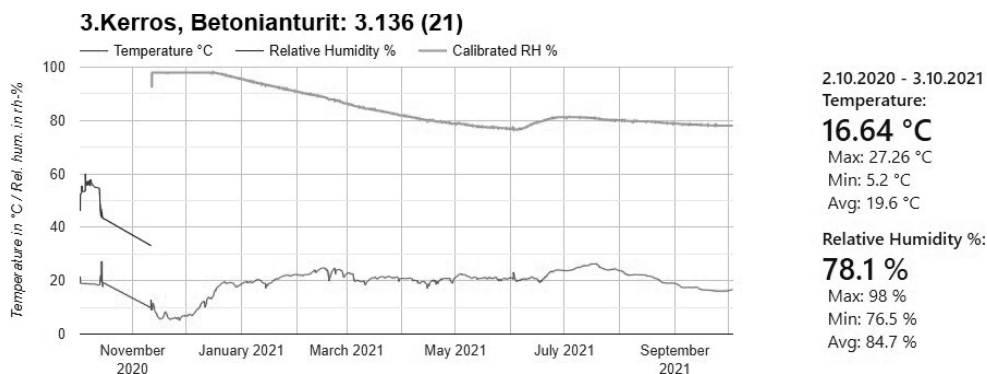
3. Mittaus MATolog -järjestelmällä

3.1 Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaaminen

MATolog CURE anturi asennetaan valumuottiin ennen valua ja anturi kestää hyvin valun rasitukset sekä mittaa luotettavasti betonin olosuhteita, kunnes anturin piirilevylle integroidun pariston virta on käytetty. Kemikaalit eivät vaikuta sen toimintaan. MATolog anturi ei ryömi. Tyypillinen lähetysväli anturille on 2 h, jolloin anturin mitoitusikä on n. 5 vuotta. Työmaalle asennetaan myös referenssi -anturi, jolloin myös työmaan olosuhteet tulevat valvotuksi.



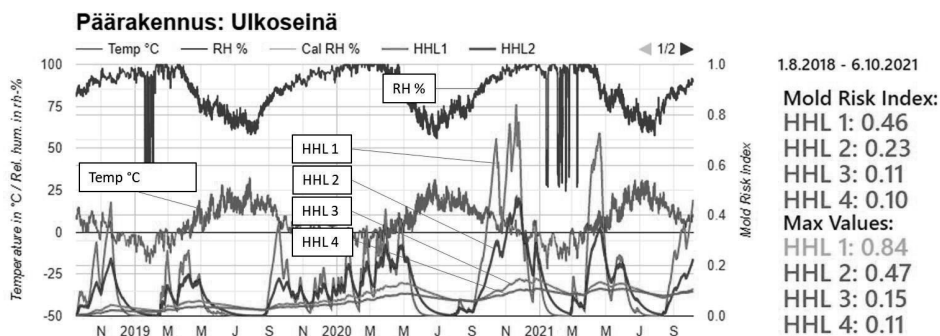
Kuva 4. MATolog CURE anturin tulokset n. vuoden ajalta betonivalusta. Valun päällystystöitä ei ole vielä aloitettu. Anturin asennussyvyys 175 mm pinnan tasosta. Kahteen suuntaa kuivuva holvirakenne. Pääjt-Hämeen keskussairaala 2021



Kuva 5. MATolog CURE anturin tulokset n. vuoden ajalta betonivalusta. Valun pinnoitustyöt on aloitettu kesäkuussa. Tuloksista voi havaita tasoitteen vaikutuksen lattian kuivumiseen. Anturin asennussyvyys 54 mm pinnan tasosta. Kahteen suuntaan kuivuva holvirakenne. Ratamokeskus (Kouvolan sairaala) 2021

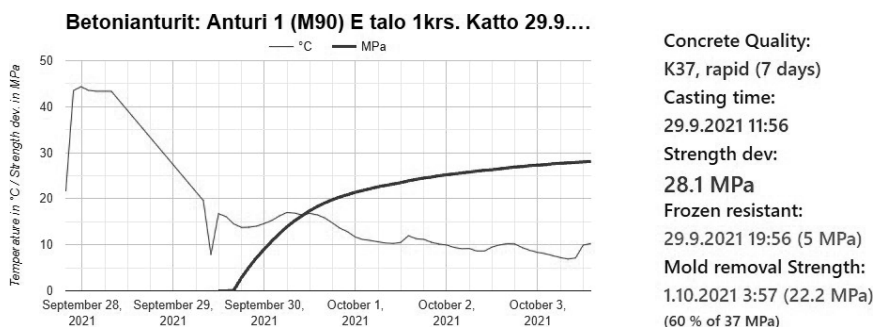
3.2 Homeriski-indeksi

Homeriskin laskenta perustuu VTT:n ja TTY:n kehittämään suomalaiseen homemalliin, joka onkin tärkeä osa Matologin raportointia. Malli luokittelee eri materiaaleille homehtumisherkkyyssluokat sekä homeriskin suuruuden [4]. Yksittäisten kosteus-/lämpötilalukemien arvot eivät ole kovin merkityksellisiä, kun arvioidaan kiinteistön kosteusteknisestä toimivuutta. Jatkuva mittaus ja homemallin algoritmit kertovat paljon enemmän kiinteistön kosteusteknisestä toimivuudesta.



Kuva 6. Kolmen vuoden homeriskiseuranta seinärakenteen sisältä. Lämmittämätön puurakennus.

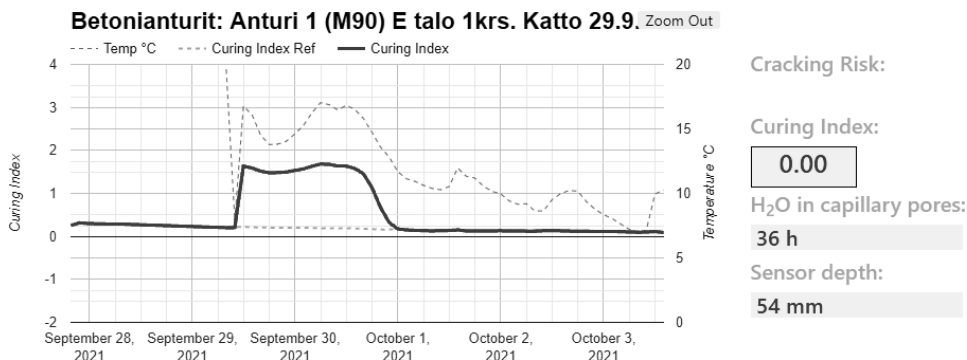
3.3 Betonivalun lujituksen kehittyminen



Kuva 7. Lujusarvio määritettynä Sadgroven -menetelmällä

3.4 Curing Index

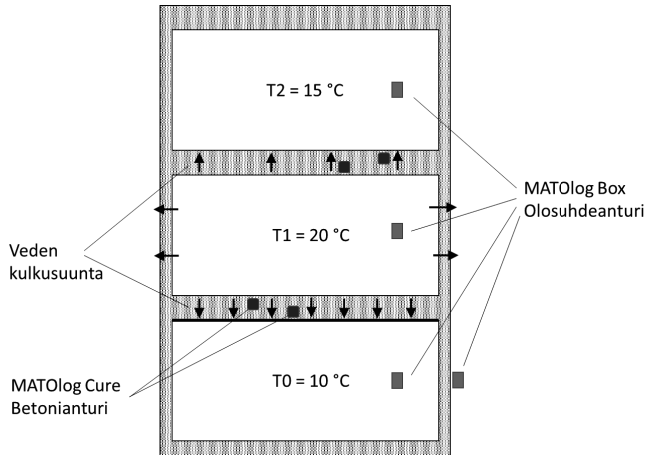
Curing Indeksillä määritetään betonirakenteesta vesi. Mittaus tunnistaa huokosrakenteesta olevan veden ja veden käytön joko hydrataation tai haihtumisen seurauksena ja se voidaan se todeta mittauksella. Mittaus sopii hyvin betonivalun jälkihoidon valvontaan sekä sen avulla tunnistetaan myös myöhemmin sateen tai vesivahingon aiheuttama kosteuskuorma rakenteelle.



Kuva 8. Curing Indexin avulla betonivalun alkuehti sekä veden määrä ovat helposti tunnistettavissa.

3.5 Kiinteistön kosteudenhallinta

Matologin teknologialla ohjataan kiinteistön kuivamista hallitusti kuivatussuunnitelman mukaisesti sekä saadaan reaaliaikaisesti tieto kosteuden liikkumisesta rakenteissa. Jatkuvan mittaamisen avulla voidaan myös laatia ennusteet kuivamisen aikataululle.



Kuva 9. MATOlog CURE ja BOX anturit luovat perustan kuivatuksen ohjaukselle.

4. Yhteenveto

Matologin uudella mittausteknologialla voidaan mitata lämpötilaa, suhteellista kosteutta sekä veden kapillaaripainetta jatkuvatoimisesti sekä tuottaa näillä mittauksilla funktionaalisuuksia, jotka ovat oleellisia rakentamisessa ja kosteudenhallinnassa. Anturit kestävät hyvin rakentamisen aikaiset rasitukset

- Kiinteistön kuivatuksen reaaliaikainen ohjaus ja seuranta
- Jatkuva lämpötilan seuranta
- Homeriskin määrittäminen
- Kosteudenhallinta rakenteiden sisältä sekä tiloista
- Kosteuden kuivumissuunta rakenteissa
- Betonin lujuuskehitys
- Betonin jälkihoito
- Kosteudenhallinta ilman mittausteknologian aiheuttamaa viivettä

Lähdeluettelo

- [1] Merikallio Tarja 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi.
- [2] Merikallio, Tarja. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu
- [3] Kuivaketju 10 – toimintamalli. Rakentamisen Laatu RALA ry. <http://kuivaketju10.fi>
- [4] VTT:n ja TTY:n kehittämä suomalainen homemalli. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>

A8. Vähähiilinen ja energiatehokas rakentaminen

Sairaalarakennuksen vähähiilisyyden arviointi – Case Tammisairaala

Elli Kinnunen ja Elisa Lindqvist
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin Tammisairaalan elinkaaren hiilijalanjälki, rakennusmateriaalien merkittävimmät päästölähteet ja mahdollisuudet päästövähennyksiin rakennusmateriaaleista. Arvioinnissa käytettiin ympäristöministeriön vähähiilisen rakentamisen arviointimenetelmää, OneClick LCA-työkalua ja urakkalaskentavaiheen IFC-malleja. Lisäksi tutkittiin talotekniikan lähtötietojen vaikutusta elinkaaren hiilijalanjälkeen kolmessa vaiheessa tarkentaen talotekniikan määriä ensin ympäristöministeriön neliöpohjaisista taulukkoarvoista laskentaohjelman sairaalarakennuksen arvoihin ja lopulta IFC:stä saataviin määriin. Näiden laskentojen perusteella havaittiin, että talotekniikan osuus materiaalien päästöistä kasvaa merkittävästi, mitä tarkemmin laskenta mallintaa todellisuutta. Sairaalarakennusten elinkaaren hiilijalanjälkeä arvioitaessa talotekniikan päästöjen arvioinnissa tulisi käyttää joko kohdekohtaisia arvoja tai niille olisi saatava niitä paremmin kuvaava taulukkoarvo kansalliseen päästötietokantaan. Laskentojen perusteella havaittiin myös, että merkittävin materiaalien päästöjen vähennyspotentiaali on välipohjarakenteissa. Markkinaehtoisilla ratkaisuilla välipohjan vähähiilisemmät materiaalit pienensivät elinkaaren hiilijalanjälkeä 4 %. Alalle tarvitaan standardiratkaisuja vähähiilisen betonin ja talotekniikan materiaalien suunnitteluun.

1. Johdanto

Maapallon maa-alasta vain noin 1 % on rakennusten peitossa, mutta yli puolet maapallon raaka-aineista kulutetaan rakentamiseen ja arvioilta noin 40 % Euroopan kokonaisenergian kulutuksesta ja noin kolmannes CO₂-päästöistä liittyy rakennuksiin [1]. Rakennetulla ympäristöllä on siis ratkaiseva merkitys ilmastonmuutoksen hillinnässä.

Ympäristöministeriö julkaisi vuonna 2017 vähähiilisen rakentamisen tiekartan [2], jonka avulla pyritään vähentämään rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä ja täten edistämään Suomen ilmastotavoitteisiin pääsemistä. Toimenpiteet tähtäävät siihen, että mahdollistetaan tiettyjen uusien rakennuksia koskevien käyttötarkoituksellisesti määriteltyjen hiilijalanjäljen raja-arvojen asettaminen 2025 mennessä [3].

Ympäristöministeriön valmisteleva rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä [4] on yksi keskeinen osa tätä tulevaa rakennuksen vähähiilisyyden säädösohjausta ja sen pohjana ovat Euroopan komission Level(s)-menetelmä [5] sekä EN-standardit (mm. EN 15643, EN 15978 ja EN 15804 ja EN ISO 14067). Jotta päästöjä voidaan vähentää, on tarpeen arvioida mistä rakennuksen osista ja missä elinkaaren vaiheissa päästöjä syntyy. Arviointimenetelmän sekä Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ylläpitämän rakentamisen päästötietokannan [6] avulla ohjataan ilmastovaikutusten laskemista.

Elinkaaren hiilijalanjälki kuvaa rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä, jotka on muunnettu yhteiseen yksikköön hiilidioksidiekvivalenteiksi (kgCO₂e). Ympäristöministeriön menetelmässä tulokset ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttien

painona jaettuna rakennuksen lämmitetyllä nettopinta-alalla ja arviointiajanjakson pituudella ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$). Menetelmän mukaan tehty hiilijalanjäljen arviointi kattaa rakennuksen koko elinkaaren, johon kuuluvat rakennustuotteiden valmistus, kuljetus ja työmaa, korjaukset ja vaihdot ja energian käyttö sekä rakennuksen purku ja jätteenkäsittely. Lisäksi arviointi sisältää hiilikädenjäljen, johon sisältyvät sellaisten ilmastovaikutusten nettohyödyt, joita ei syntyisi ilman rakennushanketta. Hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaikka sen arvo ilmoitetaan miinusmerkkisenä.

2. Lähtötilanteen kuvaus

Helsingin Meilahteen rakennetaan uusi HUS:n silmätautien klinikka, Tammisairaala. Suunnitteluvaiheessa selvitettiin mahdollisuutta asettaa hankkeelle vähähiilisyystavoitteita rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkilaskennalla.

Laskennan tavoitteena oli selvittää merkittävimmät hiilipäästöjen aiheuttajat ja esittää rakennusmateriaalien konkreettisia päästöjen vähennyskeinoja kustannusohjatusti rakennuslupavaiheessa. Vähennyskeinot tuli pystyä toteuttamaan rakennuslupa- ja lähteneitä suunnitelmia muuttamatta. Energiatohokkuuden hiilioptimointi rajattiin tämän tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 1 HUS Tammisairaala [7]

Taulukko 1 Laskennan lähtötiedot

Yleistiedot	
Rakennustyyppi	Sairaala
Rakennusvuosi	2022
Kerrosuku	5-7
Lämmitetty nettopinta-ala	33 322 m ²
Pääasiallinen rakennusmateriaali	Betoni
E-luku	243 kWh/ m ² a
E-luokka 2018	B
Oletukset päärakenteiden osalta	
Perustukset	Paikalla valettu pilari- ja seinäntura, paikallisesti paaluantura ja kallioankkurit
Alapohja	Maanvarainen laatta
Väliopohja	Ontelolaatta
Yläpohja	Pääosin ontelolaatta
Kantavat seinät	Paikalla valettuja tai teräsbetonelementtejä
Julkisivut	Sisäkuorielementtejä
Oletukset talotekniikan osalta	
Ilmanvaihtojärjestelmä	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto LTO:lla
Lämmöntuotto	Kaukolämpö ja maalämpö
Lämmönjako	Kattosäteilijät
Hissit	10 kpl
Oletukset energian osalta	
Verkkosähkö	5 152 038 kWh/a
Kaukolämpö	3 511 264 kWh/a
Kaukokylmä	510 324 kWh/a

3. Laskentaprosessin kuvaus

Jotta materiaalien hiilisäätöpotentiaali saatiin tunnistettua, arvioitiin ensin kohteen elinkaaren hiilijalanjäljen lähtötaso (laskenta 1) laskennan tekohetkellä voimassa olleella ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmällä [4]. Lähtötietoina käytettiin kohteen IFC-malleja (ARK ja RAK) ja energiatodistusta sekä talotekniikan materiaalien osalta menetelmään kuuluvia taulukkoarvoja. Myös mm. kuljetuksien ja rakentamisen päästöt arvioitiin menetelmän taulukkoarvoilla. Laskennassa käytettiin One Click LCA -työkalua.

Koska menetelmän talotekniikan taulukkoarvot vastaavat keskivertoa suomalaista rakennusta, arvoja pidettiin pieninä sairaalarakennukselle. Talotekniikan määriä pyrittiin mallintamaan tarkemmin kahdella seuraavalla laskentakierroksella: ensin käyttämällä laskentatyökalun tietokannasta löytyviä arvoja sairaalarakennuksen lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmille (laskenta 2) ja sen jälkeen tuomalla hankekohtaiset lämmitys-, vesi- ja ilmanvaihtojärjestelmien määrät kohteen LVI-mallista (laskenta 3). Molemmilla kierroksilla muut järjestelmät pidettiin lähtötason laskennan tavoin ympäristöministeriön taulukkoarvojen mukaisina.

Kolmen ensimmäisen kierroksen perusteella tunnistettiin rakennusmateriaalien merkittävimmät päästöjen aiheuttajat ja suurimmat päästöjen vähennyspotentiaalit. Neljännellä laskentakierroksella tutkittiin valittujen vähennyskeinojen vaikutusta elinkaaren hiilijalanjälkeen verrattuna laskentaan 3.

On huomioitava, että laskennan tekohetkellä voimassa olleen arviointimenetelmän mukaisesti alkuperäisten laskentojen arviointijaksoina käytettiin 100 vuotta, joka on rakennuksen suunniteltu tavoitekäyttöikä. Tätä artikkelia varten laskennat muutettiin vastaamaan 50 vuoden käyttöikä, ja

joka tulee olemaan päivitetyn arviointimenetelmän mukaan laskennoissa käytettävä arviointijakson pituus. Arviointijakson pituus vaikuttaa laskennassa ylläpidosta sekä energian kulutuksesta syntyvien päästöjen määrään.

4. Laskennan tulokset

Laskentojen tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Tuotevaiheen osuus (vaihe A1-A3: materiaalien hankinta, kuljetus ja valmistus) sairaalarakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä oli kolmen ensimmäisen laskennan perusteella 29-33 %. Suurin osa sairaalan elinkaaren hiilijalanjäljestä (56-60 %) syntyy kuitenkin käytön aikaisesta energiankulutuksesta (vaihe B6: energian käyttö).

Kolmen ensimmäisen laskelman tuloksista voidaan todeta, että materiaaleihin sitoutuneesta hiilestä suurin osa (40-49 %) oli vaakarakenteissa ja seuraavaksi suurin osuus materiaalien päästöistä oli sitoutunut talotekniikkaan (13-29 %). Tästä pääteltiin, että:

1. merkittävin päästöjen vähennyspotentiaali on välipohjan rakenteissa
2. talotekniikan osuus päästöistä vaihtelee merkittävästi riippuen lähtötiedon laadusta

Materiaalien hiilisäätömahdollisuuksia lähdettiin etsimään välipohjaratkaisujen avulla laatimalla kolmannen laskennan pohjalta neljäs laskenta, jossa välipohjien ontelolaattojen ja liittopalkkien päästöjen arviointiin käytettiin tavanomaista vähähiilisempiä materiaaleja. Laskennassa välipohjan ontelolaatat korvattiin tuotteella, jonka valmistaja on ilmoittanut olevan 40 % vähäpäästöisempi ja liittopalkkeina käytettiin tuotetta, joka valmistajan mukaan on teräsosien osalta 50 % vähäpäästöisempi. Näiden toimenpiteiden jälkeen elinkaaren hiilijalanjälki pieneni noin 4 % laskentaan 3 verrattuna.

Seuraavaksi merkittävimmät rakennusmateriaalien päästöjen vähennyspotentiaalit olivat talotekniikan materiaaleissa ja betonirakenteissa. Laskennan 3 perusteella betonin osuus materiaalien päästöistä oli yli viidenneksen ja talotekniikan materiaalit olivat yli neljännes rakenteiden päästöistä. Nämä keinot rajattiin kuitenkin tarkastelun ulkopuolelle kokeellisuutensa ja markkinoilta puuttuvien standardiratkaisujen vuoksi.

Taulukko 2. Laskentojen tulokset.

	Yksikkö	Laskenta 1	Laskenta 2	Laskenta 3	Laskenta 4
Hiilijalanjälki	kgCO ₂ e/m ² /a	26,74	27,69	28,69	27,61
A1-A3 vaihe	kgCO ₂ e/m ² /a	7,70	8,17	9,44	8,37
	%	29	30	33	30
B6 vaihe	kgCO ₂ e/m ² /a	16,01			
	%	60	58	56	58
Hiilikädenjälki	kgCO ₂ e/m ² /a	-5,16	-6,03	-6,69	-6,40
Kokonaishiilijalanjälki arviointijakson aikana (50 v)	tCO ₂ e	44551	46140	47800	45993

Taulukko 3. Sitoutunut hiili per rakenne.

	Laskenta 1	Laskenta 2	Laskenta 3	Laskenta 4
Sitoutuneen hiilen osuus per rakenne	(%)			
Perustukset ja maanalaiset rakenteet	14	13	11	13
Pystyrakenteet ja julkisivut	16	15	13	15
Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit	49	46	40	32
Muut rakenteet ja materiaalit	7	6	5	6
Alue- ja piharakentaminen	1	1	1	1
Talotekniikka	13	18	29	33

5. Haasteet ja ratkaisut

Toimeksiannon ajanmukaisessa ympäristöministeriön arviointimenetelmässä on mahdollista arvioida talotekniikan materiaalipäästöjä taulukkoarvojen perusteella, joka onkin järkevää tehdä silloin, kun kohteena oleva rakennustyyppi vastaa ns. keskivertoa suomalaista rakennusta. Sairaalassa talotekniikan määrä on tyypillisesti suuri, joten myös päästöjen määrä sairaalarakennuksessa kasvaa merkittäväksi. Tästä syystä olemassa olevien taulukkoarvojen käyttäminen talotekniikan materiaalmäärien laskentaan sairaalarakennuksessa vääristää tuloksia huomattavasti.

Sittemmin julkaistu Suomen Ympäristökeskuksen ylläpitämä Rakentamisen päästötietokanta [6] sisältää Suomessa käytössä olevien rakennustuotteiden sekä rakentamisen prosessien ja palveluiden keskimääräisiä päästötietoja. Talotekniikan materiaalien päästöt on ilmoitettu muutamille rakennustyypeille, mutta ei sairaalarakennuksille. Päästötietokanta on kuitenkin otettu käyttöön vasta tämän vuoden maaliskuussa ja sen kehitys jatkuu edelleen. Kunnes sairaalarakennusten talotekniikan päästöistä saadaan arvo päästötietokantaan, olisi talotekniikan päästöjen arviointi hankekohteisesti luotettavin menetelmä.

Varhaisessa hankevaiheessa rakennuksen mallintaminen ei tällä hetkellä ole lopputilannetta vastaavaa ja tiedot talotekniikan materiaaleista, laitteistoista ja järjestelmistä on vielä hyvin puutteellisia. Talotekniikan materiaalien päästöjen laskentaa vaikeuttaa lisäksi se, että putkimateriaalit on mallinnettu metreittäin, kun taas hiililaskentaa varten määrätiedot tarvitaan yleensä massoina, sillä päästöt lasketaan aina materiaalikiloa kohden. Toimeksiannossa eri putkimateriaalien metrimäärät muutettiin massoiksi muuttamalla ensin mallista saatujen putkien metrimäärien, paksuuksien ja halkaisijoiden avulla materiaalmäärät kuutioiksi ja tämän jälkeen kuutiomäärät materiaalin tiheyden perusteella kilogrammoiksi.

Toimeksiannon toteutushetkellä päästötietoja oli melko heikosti saatavilla Suomessa yleisesti käytettäville talotekniikan materiaaleille. Sittemmin julkaistussa päästötietokannassa joillekin talotekniikan materiaaleille on esitetty ympäristöprofiilit (kg CO₂ /kg tuotetta) ja osalle tuotteista muunnoskertoimet, esim. ilmastointikanavalle (paino kg/m tuotetta: 1,7), joten päästöjen arviointien luotettavuus on jo parantunut.

6. Yhteenveto

Laskennan perusteella merkittävin päästöjä aiheuttava tekijä sairaalarakennuksessa on käytön aikainen energiankulutus. Sairaalahankkeissa olisi suositeltavaa tarkastella energiansäästökeinoja ja näin pienentää elinkaaren hiilijalanjälkeä.

Rakennusosista merkittävin päästöjen vähennyskeino tunnistettiin välipohjarakenteissa. Välipohjatuotteiden vaihtaminen markkinoilla oleviin vähäpäästöisempiin vaihtoehtoihin pienensi elinkaaren hiilijalanjälkeä muutamilla prosenteilla. Tämä voi olla merkittävää mm. silloin, kun rakennuslupaan vaadittavan raja-arvon alitus on siitä kiinni.

Tulevaisuudessa kaivataan myös muita standardiratkaisuja materiaalien päästöjen vähentämiseksi. Talotekniikan päästöjen leikkaus ja vähähiilisemmän betonin käyttö olisivat seuraavaksi merkittävimmät toimet materiaalien päästöosuuden pienentämiseksi.

Talotekniikan materiaalien päästöjen kohdekohtainen arviointi vaatii tällä hetkellä hiilijalanjälkiarvioijalta ammattitaitoa arvioida, onko talotekniikan mallinnus riittävän tarkalla tasolla. Lisäksi tulee tuntea taloteknisissä järjestelmissä käytettyjä materiaaleja ja laitteistoja. Päästötietokannassa on saatavilla päästötietoja joillekin talotekniikan materiaaleille, joiden käyttö yhdenvertaistaa talotekniikan materiaalien päästöjen arviointia.

Lähdeluettelo

- [1] Häkkinen, T. ja Kuittinen, M. 2020. Kohti vähähiilistä rakentamista — Opas arviointiin ja suunnitteluun. Rakennustieto. 192 s.
- [2] Ympäristöministeriö. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>. Viitattu: 6.8.2021.
- [3] Ympäristöministeriö. Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän ohjeen luonnos lausuntokierrosta varten 06/2021.
- [4] Ympäristöministeriön julkaisuja 22. 2019. Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä. 58 s. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu: 6.8.2021.
- [5] Euroopan komissio. Level(s) – rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit. Saatavissa: https://ec.europa.eu/environment/levels_en. Viitattu: 6.8.2021.
- [6] Suomen Ympäristökeskus. Rakentamisen päästötietokanta. Saatavissa: <https://www.co2data.fi/>. Viitattu: 6.8.2021.
- [7] UKI Arkkitehdit Oy, Arkkitehtitoimisto Tähti-Set Oy. Havainnekuva itään. 2.11.2020.

Asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentäminen betoniteknologian keinoin

Jukka Lahdensivu
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Rakennus- ja materiaaliteollisuus on asettanut hiilineutraalisuustavoitteita tuleville vuosille yhdessä muun teollisuuden ja yhteiskunnan kanssa. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää paljon erilaisia toimia lyhyessä ajassa. Betonituotteiden ympäristövaikutukset ovat olleet tiedossa jo vuosia. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kehitettyjen sementtiä korvaavien ratkaisujen ympäristövaikutuksia tavanomaisessa asuinkerrostalossa.

Sementtiä voidaan korvata suurelta osin erilaisilla sementtiä korvaavilla sideaineilla, mutta ei kokonaan, sillä betonin lujuuden saavuttamiseksi on ainakin toistaiseksi tarvittu vähintään 20 % sementtiä. Kaupallisissa ratkaisuissa sementtiä korvaavat sideaineet ovat yleensä lentotuhka ja masuunikuona.

Tehtyjen tarkastelujen mukaan uudet vähähiiliset betonituotteet voivat lähes puolittaa asuinkerrostalon kantavaan runkoon sitoutuneen hiilijalanjäljen. Erityisesti välipohjien ja kantavien pystyrakenteiden määrä on ratkaisevaa koko rakennukseen sitoutuneen hiilijalanjäljen tarkasteluissa.

1. Johdanto

Ympäristöministeriö on asettamassa tavoitetasoja uudisrakennusten sallitulle enimmäishiilijalanjäljelle viimeistään vuonna 2025. Ministeriön ohjeistuksessa hiilijalanjälki lasketaan 50 vuoden käyttöiälle ja tarkastelu tehdään erikseen rakennukseen sitoutuneelle hiilijalanjäljelle (embodied carbon) ja rakennuksen käytönaikaisen energiankulutuksen hiilijalanjäljelle (operational carbon).

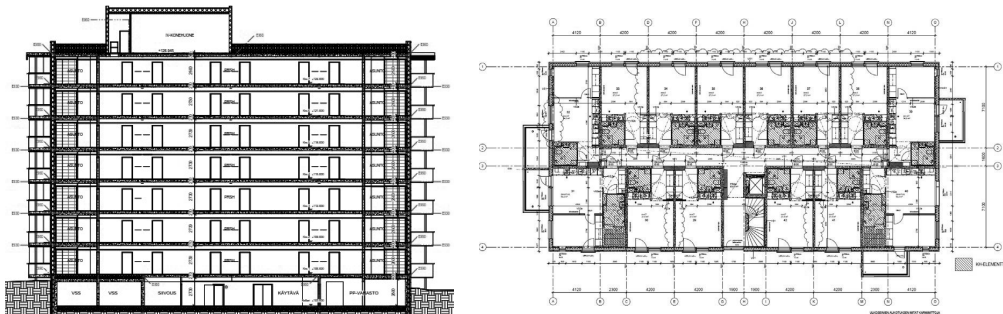
Monet rakennusliikkeet ovat asettaneet omia kunnianhimoisia tavoitteita rakennustuotannon hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Alhainen hiilijalanjälki on monen kaupungin tontinluovutuskilpailun yhtenä arviointiperusteena erityisesti pääkaupunkiseudulla. Tässä artikkelissa tarkastellaan betonirunkoisen asuinkerrostalon rakennusmateriaaleihin sitoutunutta hiilijalanjälkeä ja rakennesuunnittelijan vaikutusmahdollisuuksia hiilijalanjäljen pienentämiseen.

1.1 Esimerkkirakennus

Hiilijalanjälkitarkastelut on tehty Tampereella sijaitsevaan seitsemänkerroksiseen täyselementtitaloon. Rakennuksen ulkoseinät ovat sandwich-elementtejä, väliseinät kantavia betonielementtejä ja välipohjat sekä yläpohja ontelolaattoja. Kellarikerroksessa sijaitsevat rakenteet sekä perustukset ovat paikallavalua. Rakennuksen kokonaispinta-ala on 4583 m² ja huoneistoala 3962 m². Rakennuksen leikkaus- ja pohjapiirustus on esitetty kuvassa 1.

Rakennus on perustettu tukipaaluilla. Paaluina on käytetty sekä teräs- että betonipaaluja. Rakennuksen alapohja on maata vasten valettu betonilaatta, jonka paksuus on osalla rakennusalaan 80 mm ja osalla 200 mm. Alapohjan lämmöneristeenä on 100 mm EPS-eriste.

Ontelolaattojen betonin lujuusluokka on C40/50 ja ontelolaattojen paksuudet ovat 265 mm, 320 mm ja 370 mm rakennetyypistä riippuen. Näistä jälkimmäistä esiintyy esimerkkikohteessa eniten. Ohuempia ontelolaattoja on esimerkkikohteen yläpohjissa. Paikallavaletuissa betonirakenteissa betonin lujuusluokka on C30/37.



Kuva 1. Esimerkkirakennuksen leikkaus- ja pohjapiirustus.

1.2 Betonin GWP

Rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia kuvataan yleisesti niiden valmistuksesta aiheutuneilla kasvihuonekaasupäästöillä. Yleisesti kasvihuonekaasupäästöt lasketaan hiilidioksidiekvivalenttina, eli kaikki päästöt muunnetaan hiilidioksidipäästöiksi. Tätä kutsutaan lämpenemispotentiaaliksi (Global Warming Potential, GWP) ja sen yksikkönä käytetään $\text{kg CO}_2\text{e}$ tilavuus-, pinta-ala- tai painoyksikkö kohti.

Suomessa betoninvalmistuksessa yleisimmin käytetyt sementtilaadut ovat CEM I ja CEM II. CEM I sisältää Portland-klinkerin lisäksi noin 5 % kipsiä. Suomalaisen CEM I:n GWP vaihtelee välillä 712...764 kgCO_2e tonnia kohden (A1-A3) valmistuspaikasta ja laadusta riippuen. Kahta eri CEM I laatua valmistetaan Suomessa sekä Paraisilla että Lappeenrannassa. Kaikkien neljän eri CEM I:n keskiarvo on 742 kgCO_2e tonnia kohden (A1-A3) [1]. CEM II sisältää klinkkerin lisäksi 6...20 % masuunikuonaa [2]. Suomessa CEM II:ta valmistetaan yhtä laatua (Plussementi) kahdella eri tehtaalla. Suomalainen CEM II sisältää masuunikuonaa 10...25 % ja sen GWP on 611 tai 624 kgCO_2e tonnia kohden (A1-A3) valmistuspaikasta riippuen [1].

Betonin GWP muodostuu pääasiassa sementin valmistuksen päästöstä. Betonin päästöjä voidaan siten pienentää korvaamalla klinkkeriä muilla sideaineilla, kuten lentotuhkalla ja masuunikuonalla. Lähteen [3] mukaan lentotuhkan GWP on 0,2 kgCO_2e (A1-A3) kivihiilitonnia kohden. Hiilen energiakäytön vähetessä myös lentotuhkan saatavuus heikkenee tulevaisuudessa. Teräksen valmistuksen yhteydessä syntyvän masuunikuonan GWP on välillä 50...55 kgCO_2e (A1-A3) tonnia kohden tuotantopaikasta riippuen [1].

2. Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tutkimusaineisto koostuu esimerkkikerrostalossa esiintyvistä materiaalien määristä sekä niiden hiilijalanjäljestä. Rakenteisiin sitoutunut hiilijalanjälki määritetään laskemalla jokaiselle 18 rakennetyypille hiilijalanjälki neliometriä kohden [$\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2$]. Kokonaishiilijalanjälki saatiin laskettua kertomalla rakennetyyppien hiilijalanjälki rakennetyypin kokonaismäärällä [m^2] ja

laskemalla lopuksi kaikkien rakennetyyppien hiilijalanjäljet yhteen. Paalut ja perustukset on tarkasteltu yhtenä kokonaisuutena.

Hiilijalanjälkilaskennassa on otettu huomioon rakennuksen elinkaaren vaiheet A1-A5 sekä C1-C4 [4]. Rakennuksen käyttöikä oli laskennassa 50 vuotta. Rakennuksen käyttövaihetta (B) ei otettu huomioon energiankulutuksen osalta, sillä tarkastelussa oli vain rakennuksen sitoutuneen hiilijalanjäljen laskenta. Käyttövaihe B on tarkasteltu vain sellaisten rakennusosien kohdalta, joiden käyttöikä on alle 50 vuotta, ja materiaali/rakennusosa joudutaan uusimaan tarkastelujakson aikana. Esimerkkinä tällaisesta materiaalista on yläpohjan bitumikermikate.

Rakennusosien sitoutuneen hiilijalanjäljen laskenta toteutettiin One Click LCA -ohjelmistolla. Laskenta perustuu ympäristöministeriön ohjeistukseen, joka taas perustuu standardeihin EN-15978 [4] ja EN-15804 [5]. Materiaalien hiilijalanjälkilaskennassa on käytetty One Click LCA ohjelmiston tietokantaa eri materiaalien hiilijalanjäljistä. Vähähiilisen valmisbetonin ja betonielementtien hiilijalanjäljet perustuvat materiaalivalmistajien ympäristöselosteisiin (EPD).

3. Tulokset ja niiden tarkastelu

3.1 Rakennetyyppeihin sitoutunut hiilijalanjälki

Kerrostalon rakennetyypit, rakennetyyppeihin sitoutunut hiilijalanjälki rakennetyyppien sekä rakennetyyppien kokonaispinta-ala on esitetty taulukossa 1. Perustukset ja paalut on esitetty vain kokonaisuutena.

Taulukko 1. Esimerkkikerrostalon rakennetyyppeihin sitoutunut hiilijalanjälki.

Rakennetyyppi	Hiilijalanjälki/m ² [kgCO ₂ e/m ²]	Kokonaispinta- ala [m ²]	Kokonaishiilijalanjälki [kgCO ₂ e]
Kantava sandwich-elementti US 1	104,6	455	47593
Ei-kantava sandwich-elementti US 1	83,5	928	77488
Kellarin seinä KS 1	136,2	200	27240
VSS seinä	166,3	195	32429
Kantava väliseinä VS 1	62,7	2243	140636
Kantava väliseinä VSS 1	92,9	113	10498
Ei-kantava väliseinä VS 2	7,4	603	4462
Välipohjalaatta VP 1	93,2	3814	355465
Välipohjalaatta VP 3	159,8	255	40749
Välipohjalaatta VP 4	87,9	428	37621
Välipohjalaatta VP 6	82,0	56	4592
Alapohjalaatta AP 1	33,2	264	8765
Alapohjalaatta AP 2	45,3	48	2174
Alapohjalaatta AP 3	69,4	255	17697
Yläpohja YP 1	217,4	510	110874
Yläpohja YP 3	77,8	56	4357
Parvekelaatta	87,2	200	17440
Parvekepieli	58,1	130	7553
Perustukset			16298
Paalut			141820
Kaikki yhteensä			1105751

Rakennetyypeistä suurimmat yksittäiset hiilijalanjäljet ovat yläpohjassa (217,4 kgCO₂e/m²), väestönsuojan seinässä (166,3 kgCO₂e/m²), välipohjalaatassa VP3 (159,8 kgCO₂e/m²) kellarin seinässä (136,2 kgCO₂e/m²) ja kantavassa sandwich-elementissä (104,6 kgCO₂e/m²). Näissä kaikissa rakennetyypeissä on paljon betonia, jonka sitoutunut hiilijalanjälki (A1-A3) on suuren

massan vuoksi melko korkea. Lisäksi yläpohjassa sekä ulkoseinissä on lämmöneristeinä kevytsoraa tai mineraalivillaa, joiden valmistus vaatii paljon energiaa ja siten nostaa niihin sitoutunutta hiilijalanjälkeä.

Asuinhuoneistojen sisäiset väliseinät ovat metallirankarakenteisia kipsiväliseiniä. Näiden sitoutunut hiilijalanjälki on $7,4 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$, merkittävästi pienempi kuin raskaista materiaaleista valmistetuissa rakenteissa.

3.2 Koko rakennuksen sitoutunut hiilijalanjälki

Koko rakennukseen sitoutunut hiilijalanjälki on $1105751 \text{ kgCO}_2\text{e}$. Välipohjaan (VP1) on sitoutunut kokonaismäärällisesti eniten hiilijalanjälkeä. VP1:n rakennetyypin sitoutunut hiilijalanjälki on ($93,2 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$), mutta rakennetta on koko rakennuksessa paljon, joten se on ylivoimaisesti merkittävin hiilijalanjäljen aiheuttaja.

Kokonaisuuden kannalta toiseksi suurin hiilijalanjälki aiheutuu paaluista ($141820 \text{ kgCO}_2\text{e}$). Kolmanneksi suurin hiilijalanjälki aiheutuu kantavista betoniväliseinistä ($140636 \text{ kgCO}_2\text{e}$) lähes yhtä suurella lukemalla kuin paalut.

Yläpohjasta (YP1) aiheutuu vasta neljänneksi suurin hiilijalanjälki koko rakennusta ajatellen, vaikka rakennetyypin hiilijalanjälki neliometriä kohden oli selvästi suurin. Väestönsuojan ja kellarin seinien aiheuttama koko rakennuksen hiilijalanjälki on suhteellisen pieni, koska näin suurella rakennuksessa niiden pinta-ala kokonaisuudesta on melko vähäinen.

3.3 Vähähiilisen betonin vaikutus

Vähähiilisellä betonilla on tavallista betonia pienempi hiilijalanjälki, koska osa sementistä on korvattu vähähiilisemmällä sideaineella, kuten masuunikuonalla tai lentotuhkalla. Vähähiilisen betonin vaikutus rakenteisiin sitoutuneeseen hiilijalanjälkeen on esitetty taulukossa 2. Vähähiilisen betonin GWP on laskettu valmisbetonitoimittajan ja ontelolaattavalmistajan ilmoittamien EPDiden arvoilla. Lujusluokan C30/37 valmisbetonin GWP on $1150 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ (A1-A3) [6] ja ontelolaatan $36,5 \text{ kgCO}_2\text{e}$ (A1-A3) [7]. Laskelmissa vähähiilistä betonia on käytetty perustuksissa, betonipaaluissa ja sekä lämpimissä sisätiloissa olevissa betonirakenteissa. Vähähiilistä betonia ei toistaiseksi ole saatavissa julkisivu- ja parveke-elementteihin.

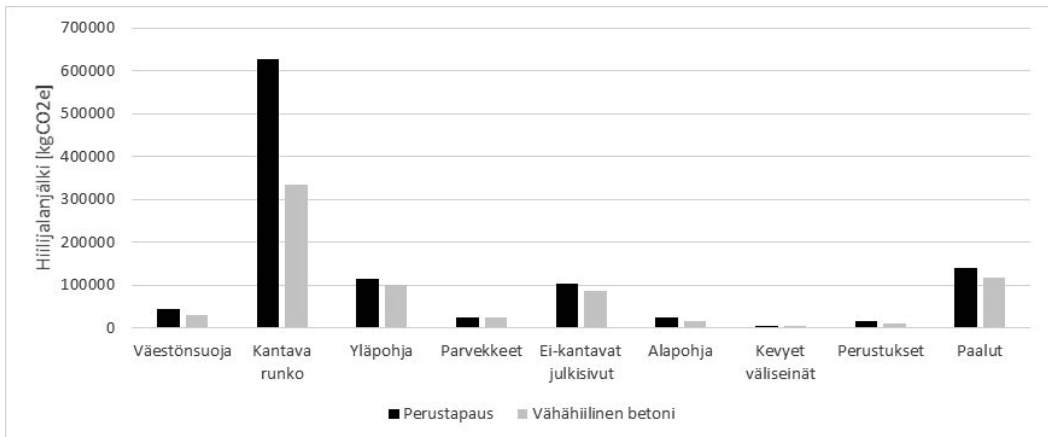
Taulukko 2. Esimerkkikerrostalon rakennetyyppeihin sitoutunut hiilijalanjälki käytettäessä vähähiilistä betonia.

Rakennetyyppi	Hiilijalanjälki/m ² [kgCO ₂ e/m ²]	Kokonaispinta- ala [m ²]	Kokonaishiilijalanjälki [kgCO ₂ e]	Ero perustapakseen [%]
Kantava sandwich- elementti US 1	77,0	455	35035	-26,4
Ei-kantava sandwich- elementti US 1	71,2	928	66074	-14,7
Kellarin seinä KS 1	105,4	200	21080	-22,6
VSS seinä	120,2	195	23439	-27,7
Kantava väliseinä VS 1	32,0	2243	71776	-49,0
Kantava väliseinä VSS 1	46,8	113	5288	-49,6
Ei-kantava väliseinä VS 2	7,4	603	4462	0

Välipohjalaatta VP 1	48,1	3814	183301	-48,4
Välipohjalaatta VP 3	86,4	255	22032	-45,9
Välipohjalaatta VP 4	47,9	428	20501	-45,5
Välipohjalaatta VP 6	41,3	56	2313	-49,6
Alapohjalaatta AP 1	20,9	264	5518	-37,0
Alapohjalaatta AP 2	26,8	48	1286	-40,8
Alapohjalaatta AP 3	38,7	255	9869	-44,2
Yläpohja YP 1	187,4	510	95574	-13,8
Yläpohja YP 3	77,8	56	4357	0
Parvekelaatta	87,2	200	17440	0
Parvekepieli	58,1	130	7553	0
Perustukset			11372	-30,2
Paalut			117883	-16,9
Kaikki yhteensä			726152	-34,3

Vähähiilisestä betonista valmistetaan koko kerrostaloon sitoutunut hiilijalanjälki on 726152 kgCO₂e, mikä on 34,3 % vähemmän kuin perustapauksessa. Merkittäviä hiilijalanjäljen pienennyksiä voidaan saada aikaiseksi runkorakenteista sekä muista runsaasti betonia sisältävistä rakenteista. Näissä hiilijalanjäljen pienenee yleensä vähintään 40 %. Merkittävistä hiilijalanjäljen pienentämisestä huolimatta välipohjissa ja kantavissa väliseinissä on edelleen sitoutunut merkittävä määrä rakennuksen hiilijalanjäljestä, niiden suuren määrän vuoksi.

Vähähiilisellä betonilla rakennuksen kantavaan runkoon sitoutunut hiilijalanjälki on 334 958 kgCO₂e, mikä on 46,5 % vähemmän kuin perustapauksessa, ks. kuva 2.



Kuva 2. Rakennuksen sitoutunut hiilijalanjälki perustapauksessa ja vähähiilisellä betonilla toteutettuna.

Paalutuksen osuus on vähähiilisestä betonista huolimatta melko suuri, 16,2 %. Tämä johtuu kohteen teräspaalujen suuresta määrästä. Julkisivun ei-kantavissa sandwich-elementeissä ainoastaan sisäkuoressa on käytetty vähähiilistä betonia, minkä vuoksi hiilijalanjäljen lasku on vähäinen. Yläpohjassa vähähiilisen betonin käyttö on vähentänyt sitoutunutta hiilijalanjälkeä 13,8

%. Vähäinen hiilijalanjäljen pienennys johtuu yläpohjan melko pienestä pinta-alasta välipohjiin verrattuna sekä kevytsoraeristeen suuresta hiilijalanjäljestä. Suomessa lämmöneristepaksuus on suuri erityisesti yläpohjassa, joten kevytsoraa tarvitaan rakenteessa noin 1000 mm paksuudelta. Kevytsoran valmistus on melko energiaintensiivistä, mikä nostaa tuotteen GWP:tä. Sama ilmiö havaitaan myös julkisivuelementtien mineraalivillojen osalla.

4. Päätelmät

Rakennukseen sitoutuneen hiilijalanjäljen tarkastelussa on otettava huomioon kokonaisuus. Yksittäisen rakennetyypin korkea hiilijalanjälki ei juuri vaikuta kokonaisuuteen, jos sitä ei ole rakennuksessa ole paljon. Hyvä esimerkki tällaisesta on väestösuojan rakenteet. Rakennetyyppien optimoimisen sijaan on tarkasteltava rakennetyypin aiheuttamaa kokonaishiilijalanjälkeä rakennuksessa.

Vähähiilisen betonin vaikutus rakennuksen runkoon sitoutuneen hiilijalanjäljen pienentämiseen oli tutkimuksessa merkittävä, sillä rungon hiilijalanjälki lähes puolittui. Julkisivuissa vaikutus oli vähäinen, koska vähähiilistä betonia on toistaiseksi saatavilla vain sisäkuoreen. Tästä syystä ulko-olosuhteisiin soveltuvan vähähiilisen betonin tuotekehitykseen tulee panostaa nopealla aikataululla.

Tuotekehitystä tarvitaan kaikilla osa-alueilla. Esimerkkikohteessa betonin jälkeen toiseksi eniten sitoutunutta hiilijalanjälkeä on lämmöneristeissä. Kohteessa käytetyn kevytsoran sekä mineraalivillan valmistus on varsin energiaintensiivistä, mikä nostaa niihin sitoutunutta hiilijalanjälkeä. Vähähiilisten lämmöneristeiden kehittäminen on tärkeää, koska Suomessa lämmöneristeitä tarvitaan paljon. Mitä enemmän vähäpäästöisiä tuotteita on markkinoilla, sitä helpompaa rakennesuunnittelijoiden on valita tällaisia tuotteita perinteisten rakennustuotteiden tilalle.

Monet suuret yhtiöt ovat asettaneet hiilineutraalisuustavoitteita tälle ja seuraavalle vuosikymmenelle. Näihin tavoitteisiin voidaan vastata vähäpäästöisillä rakennustuotteilla. Vähähiilinen betoni on erinomainen alku, mutta se ei yksin riitä.

Lähdeluettelo

- [1] Finnsementti. 2020. Environmental data sheet on Cement and building limes (EN 16908). 3 p.
- [2] Finnish Standards Association. 2012. Cement. Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements. SFS-EN 197-1. 35 p.
- [3] BauMineral GmbH. 2017. Environmental data sheet for fly ash requirements on Environmental product declaration for fly ash (EN 15804). 8 p.
- [4] Finnish Standard Association. 2011. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. SFS-EN 15978. 60 p.
- [5] Finnish Standard Association. 2012. Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. SFS-EN 15804. 64 p.
- [6] Rudus. 2020. Environmental data sheet on concrete and concrete elements (EN 16757). 1 p.
- [7] The Building information foundation RTS. 2020. Environmental data sheet on concrete and concrete elements (EN 16757). 11 p.

Kustannusneutraalit energiaremontit eri rakennustyypeissä

Janne Hirvonen¹, Juha Jokisalo^{1,2} ja Risto Kosonen^{1,2,3}

¹ Aalto-yliopisto, konetekniikan laitos, LVI- ja energiatekniikan ryhmä

² Smart City Center of Excellence, TalTech, Tallinna, Viro

³ Nanjing Tech University, College of Urban Construction, Nanjing, Kiina

Tiivistelmä

Rakennuskanta uusiutuu hitaasti, joten vanhoja taloja tulee korjata energiatehokkaammiksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja EU:n päästötavoitteiden saavuttamiseksi. Tässä tutkimuksessa koottiin yhteen eri rakennustyypeille tehtyjä aiempia selvityksiä kustannustehokkaista energiakorjauksista. Omakotitalojen ja asuinkerrostalojen lisäksi energiakorjauksia tarkasteltiin toimisto-, liike- ja opetusrakennuksissa sekä vanhainkodeissa. Asuinrakennusten tapauksissa tarkasteltiin neljän ikäluokan rakennuksia. Analysoidut tulosaineistot on luotu hyödyntäen dynaamista IDA-ICE-simulointia rakennusten toiminnan mallintamiseen ja monitavoiteoptimointia MOBO-ohjelmistolla kustannustehokkaiden energiakorjausratkaisujen löytämiseen. Tarkasteltuja toimenpiteitä olivat lisäeristäminen, ikkunoiden vaihtaminen, lämmöntalteenotto, lämpöpumppujen asennus ja aurinkoenergian hyödyntäminen. Tarkasteltavat energiaremontit olivat kustannusneutraaleja 25 vuoden elinkaarella. Pääosin päästövähennykset olivat 2 – 40 kg-CO₂/m²/a, mutta öljy- tai puulämmitteisissä omakotitaloissa päästövähennys oli jopa 40 – 115 kg-CO₂/m²/a. Tehokkain päästövähennyskeino oli lämpöpumppujen asentaminen, mikä yhdessä muiden toimien kanssa leikkasi päästöjä jopa 70-95%, rakennustyyppistä riippuen.

1. Johdanto

Rakennukset aiheuttavat EU:ssa 30-40% kasvihuonekaasupäästöistä [1]. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EPBD) linjaa, että uudet rakennukset täytyykin rakentaa kansallisten lähes nollaenergiatalo -määräysten mukaisesti vähäpäästöisiksi. Valtaosa kaikista rakennuksista on kuitenkin rakennettu ennen tiukkoja energiatehokkuusvaatimuksia. Direktiiviä onkin päivitetty kattamaan myös jo olemassaolevat rakennukset ja se vaatii niiden energiakorjauksia päästöjen vähentämiseksi. Suomessa lähes 80% rakennuksista on rakennettu ennen 2000-lukua [2], jolloin esimerkiksi vaatimukset lämpöeristämisestä olivat lievät ja eikä lämmöntalteenottoa vaadittu.

Suomen rakennuskantaan liittyen on tehty lukuisia tutkimuksia, jotka ovat näyttäneet vanhojen rakennusten energiakorjausten olevan tehokkaita ja taloudellisesti kannattavia. Tässä tutkimuksessa kootaan yhteen eri rakennustyypeille tehtyjä tutkimuksia ja vertaillaan niiden potentiaalia.

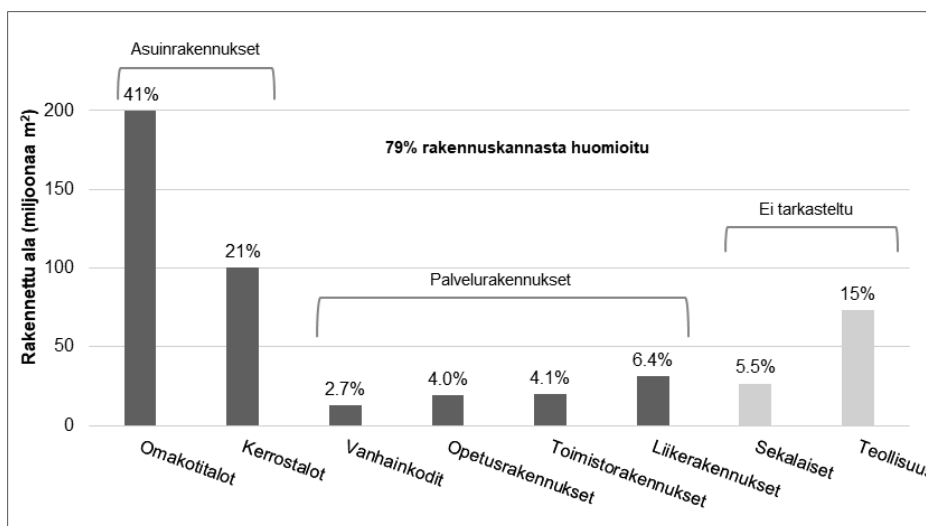
2. Menetelmät

2.1 Rakennustyypit

Tutkimuksessa huomioidut rakennustyypit on esitetty Kuvassa 1. Asuinrakennukset muodostavat suurimman osan (62%) Suomen rakennuskannasta, joten omakotitalot ja kerrostalot jaettiin neljään ryhmään rakentamisvuosien mukaan. Vanhimmat rakennukset ovat ajalta ennen rakentamismääräysten energiatehokkuusvaatimuksia (-1975, KT1 & OKT1). Toinen suuri

vanhojen rakennusten ryhmä on ensimmäisten vaatimusten aikakaudelta (1976-2002, KT2 & OKT2). Uudemmat rakennukset (2003-2009, KT3 & OKT3) hyödyntävät sekä parempaa lämmöneristystä että ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa. Uusimmissa rakennuksissa (2010-, KT4 & OKT4) eristyksen ja LTO:n tasot ovat edelleen paremmat. Kerrostaloihin liittyvät laskelmat perustuvat aiempaan optimointitutkimukseen [3], kuten myös omakotitalojen laskelmat [4]. Asuinkerrostalon vertailukohteissa oletettiin olevan kaukolämpö (KL) päälämmönlähteenä. Omakotitalojen vertailukohteissa lämmönlähddevaihtoehtoja oli useampia: suora sähkölämmitys, kaukolämpö, öljykattila ja pellettikattila.

Palvelurakennukset muodostavat 17% rakennuskannasta. Palvelurakennuksia edustivat neljä tyyppirakennusta: toimistorakennus (TSTO) [5], vanhainkoti (VANH) [6], opetusrakennus (OPETUS) [7] ja liikerakennus (LIIKE) [8]. Näissä pienemmissä ryhmissä huomioitiin vain yksi ikäluokka, joka vastasi ennen 2000-lukua rakennettua rakennusta. Palvelurakennusten vertailukohteiden lämmitysjärjestelmä oli kaukolämpö ja niissä oli koneellinen poistoilmanvaihto. Näiden lisäksi 21% rakennuksista ovat vaikeasti luokiteltavia sekalaisia rakennuksia ja teollisuussektorille kuuluvia teollisuus- ja varastorakennuksia. Näitä ei tarkasteltu tutkimuksessa.



Kuva 1. Tutkitut rakennustyyppit. Prosenttilukemat pylväiden päällä kertovat rakennustyyppin osuuden rakennuskannasta.

2.2 Korjaustoimenpiteet

Selvityksen alla olleet energiakorjaustoimenpiteet olivat pääosin samanlaisia kaikissa rakennustyypeissä, mutta niissä oli myös pieniä eroja. Liikerakennuksen tapauksessa huomioitiin ainoastaan aurinkopaneelit ja maalämpö. Rakennuksen vaipan lisälämmöneristys ja energiatehokkaiden ikkunoiden asentaminen olivat vaihtoehtoina kaikissa muissa selvityksissä, samoin kuin ilmanvaihtojärjestelmän (IV) päivitys ja lämmöntalteenoton (LTO) asentaminen, mukaan lukien tarpeenmukainen ilmanvaihdon ohjaus (VAV). Yhteisiä vaihtoehtoja olivat myös päälämmitysjärjestelmän vaihtaminen maa/poistoilma/ilma-vesilämpöpumppuun (MLP/PILP/IVLP) ja aurinkosähkön/aurinkolämmön asentaminen. Asuinkerrostaloissa toimenpiteissä oli mukana jäteveden lämmöntalteenotto lämmönvaihtimella tai lämpöpumpulla.

Omakotitaloissa ilma-ilmalämpöpumppu (IILP) oli tarjolla tukilämmitysjärjestelmäksi. Kooste eri rakennustyyppien optimoinneissa valittavina olleista energiakorjauskeinoista esitetään Taulukossa 1. Toimisto- ja opetusrakennuksissa huomioitiin myös valaistukseen ja auringon suojaukseen liittyviä toimia.

Taulukko 1. Energiaremonteissa käytetyt korjauskeinot. Harmaalla taustavärillä korostetut ruudut kertovat oliko toimenpide valittavana kyseisessä rakennustyyppissä. Merkintä X tarkoittaa, että toimenpide valittiin ainakin 50% rakennustyyppin ikäluokista. Merkintä O tarkoittaa, että toimenpide valittiin ainakin 25% kohteista.

Lämmitys- tapa	Vaippa				Ilmanvaihto		Lämmitysjärjestelmä			Aurinkoenergia		
	Seinät	Katto	Ovet	Ikkunat	LTO	VAV	MLP/IVLP /PILP	IILP	Patterit	JV- LTO	A- sähkö	A- lämpö
Kerrostalot (KT)												
KL		X	O	X		X			O	X	X	X
PILP	X	X	X	X			X			X	X	X
MLP	O	X	X	X		X	X		X	X	X	X
Omakotitalot (OKT)												
KL	X	X		X		X		X			X	X
Sähkö	X	X	X	X		X		X			X	X
MLP	X	X	O	X		X	X		X		X	X
Puu	X	X	O			X						X
Vanhainkodit (VANH)												
KL	X	X		X	X						X	X
IVLP	X	X		X	X		X				X	X
Opetusrakennukset (OPETUS)												
KL				X	X						X	X
MLP		X		X	X		X				X	
Toimistorakennukset (TSTO)												
TSTO KL	X	X		X	X	X					X	
TSTO MLP				X	X	X	X				X	
Liikerakennukset (LIIKE)												
KL											X	
MLP							X				X	

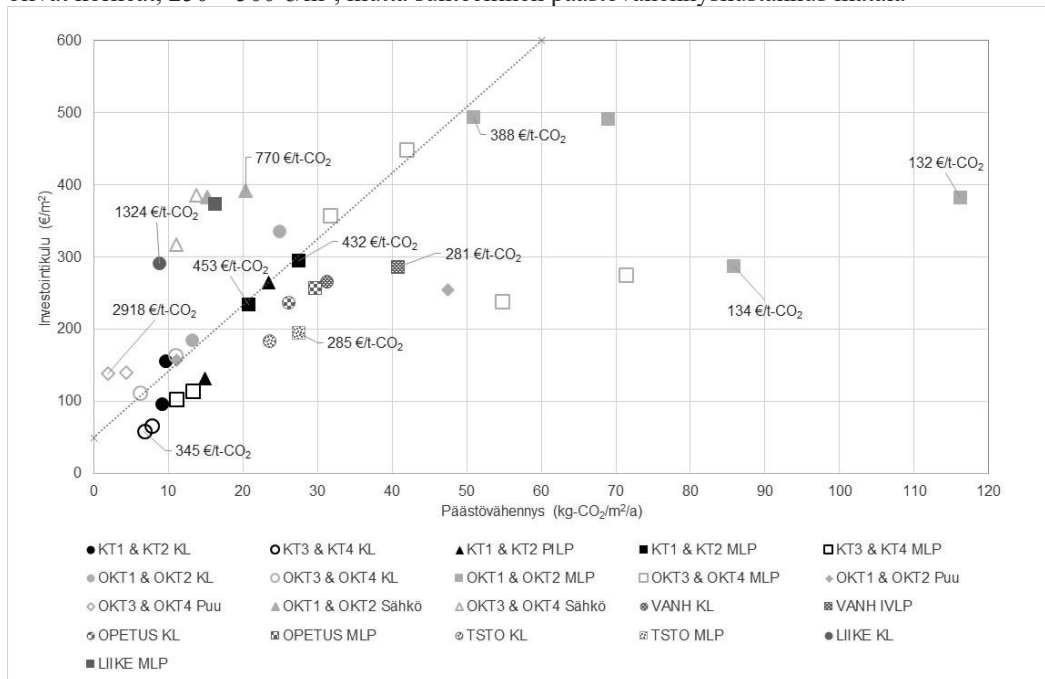
2.3 Laskenta

Koontitutkimuksessa on käytetty aiemmissa selvityksissä löydettyjä kustannusneutraaleja energiakorjauspaketteja, joissa remontilla saadut kustannussäästöt kompensoivat elinkaaren aikana remontin investointikustannukset. Rakennusten energiankulutus ennen ja jälkeen energiakorjauksien on alkuperäisissä tutkimuksissa selvitetty dynaamisilla simulaatioilla, hyödyntäen tuntikohtaista laskentaa IDA-ICE-ohjelmistolla. Asuinkerrostalon, omakotitalon, toimistorakennuksen, vanhainkodin ja opetusrakennuksen laskelmat perustuvat optimointitutkimuksiin, joissa monitavoiteoptimoinnin avulla etsittiin eniten päästöjä vähentäviä korjaustoimenpidekokonaisuuksia eri elinkaarikustannustasoilla. Näistä korjauspaketeista tähän tutkimukseen valittiin kustannusneutraalit tapaukset eli ne, joiden elinkaarikustannus oli sama kuin vertailutapauksilla, joissa energiakorjauksia ei tehty. Optimoinnit suoritettiin MOBO-ohjelman avulla, käyttäen NSGA-II-algoritmia.

Eri tutkimuksissa on käytetty erilaisia oletuksia energian hinnalle ja energiantuotannon päästöille. Tässä koontiartikkelissa sähkön päästökertoimena sähkölle käytettiin Energiategollisuuden raporttoimien tuntikohtaisten päästöjen viiden vuoden keskiarvoa 133 kg-CO₂/MWh [9]. Kaukolämmön päästökertoimena käytettiin kansallista vuotuista keskiarvoa 164 kg-CO₂/MWh [10]. Lämmitysöljyn päästökerroin oli 263 kg-CO₂/MWh [11]. Tavanomaisesta menettelystä poiketen, puun polttamista ei oletettu nollapäästöiseksi, vaan puulle käytettiin päästökerrointa 403 kg-CO₂/MWh [11], polttamishetkellä vapautuvan hiilidioksidin mukaisesti. Kaukolämmön kustannuksissa huomioitiin energian lisäksi vuotuisten huipputehojen mukainen tehomaksu. Laskenta suoritettiin 25 vuoden ajanjaksolla, käyttäen 3% reaalikorkoa ja 2% vuotuista energian hinnan nousua.

3. Tulokset

Kaikissa rakennustyypeissä saatiin aikaan merkittäviä päästövähennyksiä. Kuva 2 esittää kaikkien rakennusten elinkaareltaan kustannusneutraalien energiakorjausten investointikulut suhteessa päästövähennyksiin. Kuvassa näkyvän katkoviivan yläpuolella olevat tapaukset olivat päästövähennyshinnaltaan kalliimpia kuin viivan alapuolella olevat. Joihinkin tapauksiin on myös merkitty erikseen päästövähennyskustannus. Tämä kustannus on saatu jakamalla energiakorjauksen investointikulu 25 vuoden aikana päästämättä jääneellä hiilidioksiditonnimäärällä. Luku ei kuitenkaan huomioi elinkaaren aikana säästettyjä energiakuluja, joiden myötä vähennyskustannus putoaa kaikissa tapauksissa nolnaan, koska tapaukset olivat elinkaareltaan kustannusneutraaleja. Suurimmassa osassa tapauksia päästövähennykset olivat 2 – 40 kg-CO₂/m²/a ja investointikulut 50 – 300 €/m². Päästövähennykset olivat pääosin lineaarisessa suhteessa investointien suuruuteen. Rakennuskohtaisilla lämmityskattiloilla varustetuissa omakotitaloissa päästöjä voitiin kuitenkin lämpöpumppujen avulla leikata jopa 40 – 115 kg-CO₂/m²/a. Tällöin absoluuttiset investointikulut olivat korkeat, 250 – 500 €/m², mutta suhteellinen päästövähennyskustannus matala



Kuva 2. Investointikulu vs. päästövähennys elinkaareltaan kustannusneutraaleille energiakorjauksille.

Sähkölämmityksessä omakotitaloissa investointikulu oli suuri. Tätä selittää sähkölämmityksen korkea hinta ja matala päästökerroin, jolloin elinkaaren aikana saadut rahalliset säästöt mahdollistivat suuret investoinnit. Samaan aikaan, jo valmiiksi puhdasta sähköä käyttäessä päästöleikkaukset olivat rajalliset. Juuri päinvastoin oli omakotitaloissa, joissa käytettiin korkeapäästöistä puu- tai öljylämmitystä. Kun polttaminen vaihdettiin lämpöpumppuun, saatiin suuria päästövähennyksiä. Suhteessa halvimmat päästövähennykset saatiinkin vanhoissa puulämmitteisissä omakotitaloissa, joihin asennettiin maalämpöpumppu (132 €/t-CO₂) ja kalleimmat taas uusissa puulämmitteisissä omakotitaloissa, joissa puulämmitysjärjestelmä säilytettiin (2918 €/t-CO₂).

Palvelurakennuksista suurimmat päästövähennykset saatiin vanhainkodissa, jossa poistoilmanvaihto vaihdettiin lämmöntalteenotolla varustettuun tulo-poisto-ilmanvaihtoon. Vanhainkodit ja muut hoitorakennukset ovatkin hyviä kohteita energiakorjauksille, koska ne ovat käytössä vuoden jokaisena päivänä. Toimisto- ja opetusrakennuksissa oli tulo-poisto-IV ilman LTO:ta, mutta sen lisääminen oli kannattava investointi. Maalämpöön siirtyminen oli kaikissa kohteissa kustannustehokasta ja päästövaikutus oli suuri, mutta sen välittömät investointikulut olivat korkeat.

Suurimmat päästöleikkaukset (70 – 95%) saatiin tapauksissa, joissa muiden toimien ohella vaihdettiin päälämmitysjärjestelmä öljy- tai pellettikattilasta tai kaukolämmöstä lämpöpumppuun. Jos alkuperäinen kaukolämpöjärjestelmä säilytettiin, saatiin muilla toimilla edelleen 20 – 65% päästövähennys, tapauksesta riippuen. Vanhoissa asuinrakennuksissa (KT1 & KT2, OKT1 & OKT2) vähennykset olivat suurempia kuin uusissa. Investoinnit palvelurakennusten energiatehokkuuteen olivat kannattavampia kuin asuinkerrostalojen energiaremontit.

Aurinkosähkö oli mukana kustannusneutraaleissa korjauspaketeissa kaikissa rakennustyypeissä. Liikerakennuksissa se oli kuitenkin lämmitysjärjestelmän vaihdon lisäksi ainoa valittavana ollut toimenpide, jolloin aurinkosähköjärjestelmä ylimitoitettiin ja sen kustannustehokkuus kärsi. Päälämmitysjärjestelmän vaihtaminen lämpöpumppuun oli erittäin kustannustehokas toimenpide kaikissa rakennustyypeissä. Omakotitaloissa ulkoseinien lisäeristys oli kannattavaa, mutta muissa rakennuksissa yleensä ei. Omakotitaloissa ilma-ilmalämpöpumppu oli aina kannattava tukilämmitysmuoto. Palvelurakennuksissa koneellisen poistoilmanvaihdon korvaaminen tulo-poisto-ilmanvaihdolla ja lämmöntalteenotolla oli kannattavaa. Asuinrakennuksissa läsnäolon mukaan säädettävä tarpeenmukainen ilmanvaihdon ohjaus oli kannattava lisäys, jos talossa oli jo valmiiksi koneellinen tulo-poisto-ilmanvaihto. Kerrostaloissa jäteveden lämmöntalteenotto oli aina kannattavaa, kun oletettiin sillä voitavan esilämmittää lämmintä käyttövetä ennen muiden energiamuotojen hyödyntämistä.

Lisää yksityiskohtia voi lukea laajemmasta alkuperäisistä rakennuskohtaisista lähdeartikkeleista tai laajemmasta koontiartikkelista [12].

4. Yhteenveto

Merkittävät päästövähennykset energiakorjausten kautta (20 – 95%) ovat mahdollisia kaikissa rakennustyypeissä. Energiakorjausten investointikustannus on useimmiten pienempää kuin tavanomaisen putkiremontin kustannus (50 – 300 €/m²), mutta energiaremontit maksavat itsensä ajan myötä takaisin. Kustannusneutraalien päästövähennysinvestointien vaikutus riippui rakennuksen lämmityksen kustannuksien ja päästöjen suhteesta.

Analysoiduissa aineistoissa parhaita investointikohteita olivat vanhat omakotitalot, joissa lämmitys tapahtuu omalla lämpökattilalla. Investoinnit palvelurakennuksiin olivat hieman kustannustehokkaampia kuin asuinkerrostalojen investoinnit. Omakotitaloissa hyviä energiakorjaustoimenpiteitä olivat tukilämmitys ilmalämpöpumpulla ja ulkoseinien lisälämmöneristys. Asuinkerrostaloissa jäteveden lämmöntalteenotto sekä katon ja ikkunoiden lämmöneristystason parantaminen olivat kannattavia toimenpiteitä. Palvelurakennuksissa ikkunoiden ja ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen sekä valaistuksen automaatiohjaus valikoituivat kustannusneutraaleihin korjauspaketteihin. Aurinkosähköpaneelit ja päälämmitysjärjestelmän vaihtaminen lämpöpumppeihin olivat kannattavia hankintoja kaikissa tapauksissa. Lämpöpumppujen etuna oli sähkön kaukolämpöä pienempi päästökerroin, joten kaukolämmön puhdistuminen esim. pienydinvoiman avulla pienentäisi lämpöpumppujen suhteellista etua.

Lähdeluettelo

- [1] European Parliament, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.” 2010.
- [2] Tilastokeskus, “Rakennukset käyttötarkoituksen ja rakentamisvuoden mukaan,” Tilastokeskuksen PX-Web tietokannat, 2017. [Online]. Available: https://pxnet2.stat.fi:443/PXWebPXWeb/pxweb/fi/StatFin_Passiivi/StatFin_Passiivi__asu__rakke/statfinpas_rakke_pxt_001_201700.px/. [Accessed: 20-Aug-2021].
- [3] J. Hirvonen, J. Jokisalo, J. Heljo, and R. Kosonen, “Towards the EU emissions targets of 2050: optimal energy renovation measures of Finnish apartment buildings,” *International Journal of Sustainable Energy*, Dec. 2018.
- [4] J. Hirvonen, J. Jokisalo, J. Heljo, and R. Kosonen, “Towards the EU Emission Targets of 2050: Cost-Effective Emission Reduction in Finnish Detached Houses,” *Energies*, vol. 12, no. 22, p. 4395, Jan. 2019.
- [5] T. Niemelä, K. Levy, R. Kosonen, and J. Jokisalo, “Cost-optimal renovation solutions to maximize environmental performance, indoor thermal conditions and productivity of office buildings in cold climate,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 32, pp. 417–434, Jul. 2017.
- [6] J. Jokisalo, P. Sankelo, V. Juha, K. Sirén, and R. Kosonen, “Cost optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate,” presented at the CLIMA 2019, 2019.
- [7] T. Niemelä, R. Kosonen, and J. Jokisalo, “Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate,” *Applied Energy*, vol. 183, pp. 1005–1020, Dec. 2016.
- [8] A. Saari and M. Airaksinen, “Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta [In Finnish].” EU Commission, 2012.
- [9] Energiateollisuus, “Sähkön päästökertoimet, sähköpostikysely,” 2017.
- [10] Motiva Oy, “CO₂-päästökertoimet,” Motiva, 2017. [Online]. Available: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet. [Accessed: 14-Jan-2018].
- [11] Tilastokeskus, “Polttoaineluokitus,” 2019. [Online]. Available: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html.
- [12] J. Hirvonen, J. Jokisalo, P. Sankelo, T. Niemelä, and R. Kosonen, “Emission Reduction Potential of Different Types of Finnish Buildings through Energy Retrofits,” *Buildings*, vol. 10, no. 12, p. 234, Dec. 2020.

Rakennukset materiaali- ja rakennusosapankkeina

Laura Majoinen ja Ville Mäntylä
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

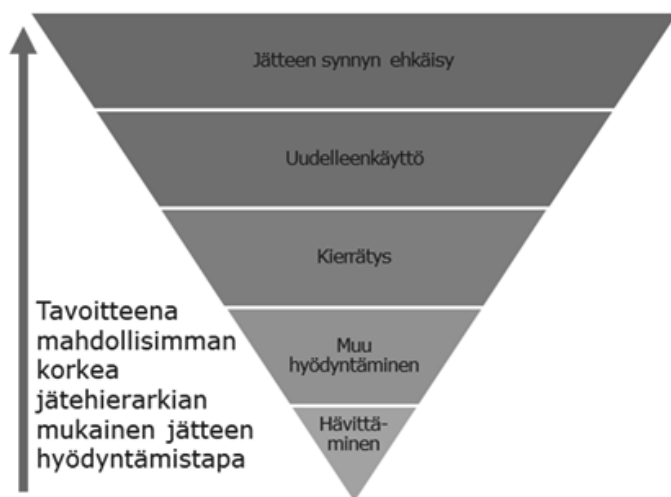
Kiinteistö- ja rakennustoimialan vaikutus globaaliin resurssien kulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöjen määrään on merkittävä. Toimiala tarvitsee uusia toimintatapoja ja uudenlaisia tuotteita vähentääkseen neitseellisten raaka-aineiden tarvetta ja kasvihuonekaasupäästöjä.

Suomessa puretaan noin 4000–5000 rakennusta vuodessa. Sen sijaan, että rakennukset puretaan perinteisin menetelmin maanrakennusjakeiksi ja rakennusjätteiksi, niitä voidaan käyttää tehokkaammin hyväksi materiaaliresurssina. Purettavat rakennukset voivat toimia sekä rakennusosien että uusiotuotteiden materiaalien raaka-ainepankkeina. Uudelleenkäyttö ja purkujätteen kierrätys edellyttää laadukkaita purkuhankkeen ennakkotutkimuksia ja huolellista purkuuunnittelua. Prosessi vaatii myös aikataulujen tehokasta suunnittelua ja ennakointia, jotta tavoitteisiin päästään ja purettavasta rakennuksesta voidaan saada kaikki hyöty irti.

1. Johdanto

Rakennustoimiala käyttää maailmanlaajuisesti noin 40 prosenttia kaikista maailman raaka-aineista ja aiheuttaa 1/3 kasvihuonekaasupäästöistä. Kiristyneiden ja alati kiristyvien päästötavoitteiden näkökulmasta rakentamisen ala on siis merkittävän uudistumisen edessä. Toimiala tarvitsee uusia toimintatapoja ja uudenlaisia tuotteita vähentääkseen neitseellisten raaka-aineiden tarvetta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Toimialan kunnianhimoiset vähähiilisyysliittävät tavoitteet edellyttävät uusien, vähähiilisten tuotteiden tuleamista markkinoille. Pääosin markkinat ovat tarttuneet tämän ratkaisemiseen kehittämällä ja valmistamalla tuotteitaan vähäpäästöisemmistä raaka-aineista ja materiaaleista, ja uudistuminen tapahtuu uusien tuotteiden valmistamisen kautta.

Kiertotalous on talouden malli, joka perustuu resurssien kiertoon ja se tarjoaa mahdollisuuden rakennusalan ympäristövaikutusten pienentämiseen. Kiertotalouden tavoitteena on pidentää tuotteiden elinkaarta, edistää tuotteiden uudelleenkäyttöä ja lisätä materiaalien kierrätystä. Uudelleenkäytöllä tarkoitetaan käytöstä poistetun tuotteen käyttöä uudestaan samassa käyttötarkoituksessa, eli esimerkiksi purettavasta rakennuksesta poistettu ikkuna käytetään ikkunana toisessa rakennuksessa. Kierrätys sen sijaan tarkoittaa ikkunan materiaalien käyttöä uusien tuotteiden valmistuksessa eli esimerkiksi ikkunalasin käyttöä eristemateriaalin valmistuksessa. Tuotteiden ja materiaalien hyödyntämisen eri asteita voidaan kuvata jätehierarkian avulla (kuva 1).



Kuva 1. Jättehierarkia

Kiertotalouden mahdollisimman korkea toteutuminen edellyttää uudelleenkäyttöön soveltuvien osien ja kierrätykseen kelpaavien materiaalien tunnistamista jo ennen purkua huolellisten ennakkotutkimusten yhteydessä.

Tässä esityksessä keskitytään purettavien rakennusten hyödyntämiseen materiaali- ja rakennusosapankkeina. Aineisto perustuu kokemuksiin purkamisen, haitta-aineiden ja kiertotalouden asiantuntijana toimimisesta rakennusten kokonaispurkuhankkeissa. Ramboll on mukana useissa tutkimus- ja kehityshankkeissa, joissa selvitetään rakennusosien uudelleenkäytön mahdollisuuksia ja edistämisen edellytyksiä. Näitä hankkeita ovat mm. Purater, ReCreate sekä Circuit, jotka kaikki tähtäävät rakennusten ja rakennusosien uudelleenlaiseen elinkaariajatteluun.

2. Purkamisen nykytila ja määrä Suomessa

Rakennus- ja purkujätettä arvioidaan syntyvän vuosittain Suomessa noin puolitoista miljoonaa tonnia. Luku ei sisällä maamassoja. Tästä suurin osa, n. 58 %, syntyy korjaamisesta, n. 27 % kokonaisten rakennusten purkamisesta ja n. 15 % uudisrakentamisesta. EU:n jätedirektiivin ja Suomen jätelainsäädännön mukaan rakennus- ja purkujätteestä tulisi hyödyntää materiaalina 70 %. Tällä hetkellä materiaalihyödyntämistason on arvioitu olevan noin 50–60 %. Lisäksi merkittävä osa hyödyntämisestä on jättehierarkiassa matalalle luokiteltua betonimurskeen hyödyntämistä maarakentamisessa [1].

Huuhka ja Lahdensivu [2] tutkivat purettavien rakennusten jakaumaa. Vuosien 2000 ja 2012 välillä purettiin yhteensä 50 818 rakennusta, ja noin 3,200–4,500 rakennusta joka vuosi. Purettujen rakennusten pinta-ala oli yhteensä hieman yli 9 miljoonaa neliometriä. Suurin osa puretuista rakennuksista oli ei-asuinrakennuksia (51 % lukumäärästä ja 76 % pinta-alasta). Kaiken kaikkiaan purettavista rakennuksista lukumäärältään merkittävimmät rakennustyypit olivat teolliset rakennukset (1,7 miljoonaa m², yleensä betonirakenteisia), omakotitalot (1,4 miljoonaa m², yleensä puurakenteisia), julkiset rakennukset (1,3 miljoonaa m², puu- tai betonirakenteisia) ja liike- ja varistorakennukset (yhteensä 2,3 miljoonaa m², tavallisesti betonirakenteisia). Betonijäte onkin etenkin kokonais- ja osapurkukohteissa usein massaltaan suurin yksittäinen jätelaji. [1]

3. Purkuhankkeen ennakkotutkimukset ja suunnittelu

Kokemuksemme mukaan huolelliset ennakkotutkimukset ja hyvä aikataulusuunnittelu ovat purkumateriaalien hyötykäytön ja uudelleenkäytön edellytys. Hyvin laaditulla aikataululla tuetaan purkuhankkeen kiertotaloustavoitteiden toteutumista. Realistinen aikataulu on myös riskienhallintaa. Hankkeen aikaiset muutokset pystytään hallitsemaan paremmin eikä niistä aiheudu aikataulupaineita.

3.1 Purkukartoitus ja purkumateriaaliselvitys

Purkukartoitus on kokonaisvaltainen selvitys purettavan rakennuksen osien ja materiaalien uudelleenkäyttö- ja kierrätyspotentiaalista [3]. Purkukartoituksessa selvitetään purettavat rakennusosat ja niiden määrät, mahdolliset haitta-aineet sekä purettavien rakennusosien uudelleenkäyttömahdollisuudet joko kokonaisina rakennusosina tai kierrätysmahdollisuudet uusiotuotteiden raaka-aineena. Purkukartoitus koostuu asbesti- ja haitta-ainekartoituksesta ja -tutkimuksista sekä purkumateriaaliselvityksestä. Kokemuksemme mukaan myös betonin hyötykäyttötutkimukset kannattaa sisällyttää osaksi purkukartoitusta.

Purkumateriaaliselvitys koostuu sekä uudelleenkäyttävien rakennusosien kartoituksesta että tavanomaisten purkujätteiden määräraviosta. Mikäli rakennusosille suunnitellaan uudelleenkäyttöä, täydennetään purkukartoituksen tietoa rakenteiden tarkemmilla tutkimuksilla. Tutkimuksessa uudelleenkäytettävän rakennusosan mitat, kunto ja tekniset ominaisuudet on selvitettävä niin laajasti, että voidaan varmistua rakennusosan soveltuvan uudelleenkäyttöön. Pääsääntöisesti uudelleenkäytettävän osan tulee täyttää vastaavalle uudelle tuotteelle asetetut vaatimukset.

Vakiintunutta prosessia rakennusosan soveltuvuuden selvittämiseksi ei ole vielä olemassa, mutta mm. vuonna 2021 käynnistynyt ReCreate-hanke [4] selvittää betonielementtien uudelleenkäytön edellytyksiä ja mahdollisuuksia koko rakentamisen prosessin näkökulmasta. Tähän kuuluu mm. purettavien, hyödynnettäväksi tunnistettujen betonielementtien tutkimusten kirkastaminen konkreettiseksi toimintaprosessiksi.

Purkumateriaaliselvitys sisältää myös jätelajikohtaisen purkujätteen määräraivion. Määräraivio voidaan laatia joko vanhojen suunnitelmien tai kohteesta laaditun inventointimallin perusteella. Selvityksen pohjana olevan materiaalin tarkkuus ja ajantasaisuus on keskeisessä asemassa arvion luotettavuuden näkökulmasta. Laserkeilausaineiston perusteella laadittu inventointimalli on edellytys luotettavan määräraivion laadinnassa hankkeissa, joissa on käytettävissä vain vähän suunnitelma-aineistoa. Lisäksi monimutkaisten rakenteiden laskenta on merkittävästi nopeampaa mallin avulla kuin perinteisesti suunnitelmien pohjalta.

Suosittelavaa on, että määräraivio laaditaan ainakin seuraaville materiaaleille [3]:

- Betonijäte
- Tiilijäte
- Laatat ja keramiikka
- Sekalainen betonijäte
- Puujäte
- Lasijäte
- Muovijäte
- Asfalttijäte
- Kattohuopajäte
- Eristysaineet
- Kipsijäte
- Sekalainen rakennusjäte

Määräraivion lisäksi purkumateriaaliselvitykseen on suositeltavaa liittää tieto esimerkiksi materiaalin käsittelytavasta (uudelleenkäyttö, materiaalihyödyntäminen, energiahyödyntäminen, loppusijoitus)

3.2 Asbesti- ja haitta-ainetutkimukset

Ennen rakennuksen purkamisesta pitää selvittää riittävän laajasti rakennusmateriaalien haitta-aineet. Purettavista materiaaleista pitää tunnistaa kierrätykseen tai uudelleenkäyttöön kelpaamattomat materiaalit ja niiden mahdollisesti sisältämät haitta-aineet. Asbestin lisäksi pitää selvittää muut haitalliset aineet kuten PAH-yhdistepitoiset, PCB-pitoiset ja raskasmetallipitoiset materiaalit.

Tutkimuksen pitää olla niin järjestelmällinen ja luotettava, että sen perusteella saadaan käsitys rakennuksen haitta-aineista. Tämä tarkoittaa riittävää määrää ja oikein kohdennettuja rakenneavauksia sekä asiantuntevan ja akkreditoidun laboratorion käyttämisestä. Asbesti- ja haitta-aineasiantuntijan ammattitaito ja perehtyneisyys eri rakennusaikakauden rakennusratkaisuihin ja haitta-ainepitoisiin materiaaleihin on tärkeä osa tutkimusten laadunvarmistuksessa. Kun purkukartoitus tehdään asbesti- ja haitta-ainetutkimusten yhteydessä, asbesti- ja haitta-aineasiantuntijan on mahdollista laatia myös purkumateriaaliselvitys.

3.3 Betonin ja tiilien hyötykäyttökelpoisuusselvitys

Asbesti- ja haitta-ainetutkimuksen yhteydessä on suositeltavaa selvittää purkubetoneiden ja -tiilien hyötykäyttökelpoisuus. Tällä tarkoitetaan selvitystä, jossa betonista ja tiilistä selvitetään MARA-kelpoisuus, joka laaditaan Vna 843/2017 mukaisesti. Samoista näytteistä voidaan selvittää kaatopaikkakelpoisuus (Vna 331/2013), jos materiaalit eivät täytä asetuksessa VNa 843/2017 asetettuja raja-arvoja. Myös aistinvaraisesti havaitut viitteet purettavien betoneiden ja -tiilien haitta-aineista suositellaan kirjattavan haitta-aineraporttiin.

Mitä tarkemmin purku-urakan laskentavaiheessa on tiedossa kohteen purettavien betoni- ja tiilijätteiden hyödynnettävyys, sen tarkempia ja edullisempia urakkatarjouksia purkutyöstä on saatu. Hyötykäytettävien purkubetonimassojen ohjaaminen tapahtuu yhteistyössä kaupungin tai kunnan massakoordinaattorin kanssa. Tällä voidaan välttää turha välivarastointi ja massat saadaan kuljetettua oikea-aikaisesti lopulliseen sijoituspaikkaansa.

3.4 Purkusuunnittelu

Purkusuunnittelussa huomioidaan purkukartoituksessa tunnistetut uudelleenkäytettävät tai kierrätettävät rakennusmateriaalit ja -osat sekä koneet ja laitteet. Purkutyöselostuksessa esitetään mm. asbesti- ja haitta-ainepurkutöiden ja muun purkutyön vaiheet sekä esitetään tapoja purkujätteiden ja -materiaalien käsittelyyn ja sijoitukseen. Purkusuunnitelmat ovat lähtötietona hankkeen päätoteuttajalle sekä tulevalle purku-urakoitsijalle purkuhankkeen laadukkaaseen ja turvalliseen toteuttamiseen ja kiertotaloustavoitteiden saavuttamiseen.

Jos rakennusosia halutaan käyttää uudestaan, asettaa se erityisiä vaatimuksia purkusuunnittelulle. Uudelleenkäytettävien rakennusosien irrotuksesta pitää olla suunnitelma, miten se tehdään turvallisesti ja rakennusosaa vaurioittamatta. Kokemuksemme mukaan uudelleenkäyttö ja sen suunnittelu on kuitenkin vasta pilotointitasolla.

4. Uudelleenkäytettävien rakennusosien hiilijalanjälki

Purettavan rakennusosan hiilijalanjälki muodostuu

- irrotuksesta
- kuljetuksesta
- mahdollisesta kunnostuksesta sekä
- uudelleen asentamisesta.

Koska uuden betonielementin hiilijalanjäljestä merkittävin osa muodostuu raaka-aineen hankinnasta ja käsittelystä [5] on uudelleenkäytetyn rakennusosan hiilijalanjälki huomattavasti pienempi kuin vastaavan uuden tuotteen hiilijalanjalanjälki.

5. Uudelleenkäytettävien rakennusosien tuotehyväksyntä

Yleisesti ottaen rakennustuotteiden kelpoisuus osoitetaan CE-merkinnällä, jos tuote kuuluu harmonisoidun tuotestandardin soveltamisalaan tai valmistaja on hakenut tuotteelle ETA:n (eurooppalainen tekninen arviointi). Lisäksi sellaisille rakennustuotteille, joille ei ole määritelty Euroopan tasoista harmonisoitua tuotestandardia tai eurooppalaista teknistä arviointia, voidaan käyttää kansallista hyväksymismenettelyä kuten tyyppihyväksyntää tai varmennustodistusta. [6].

Sellaisen tuotteen kelpoisuus, joilla ei ole CE-merkintää tai vapaaehtoisin menettelyihin perustuvaa osoitusta esimerkiksi tyyppihyväksyntää, voidaan varmentaa rakennuspaikkakohtaisesti. Uudelleenkäytettävän rakennusosan kohdalla rakennuspaikkakohtaisella varmentamisella voidaan osoittaa tuotteen täyttävän sille asetetut tekniset vaatimukset. [6]. Käytännön hankkeissa vakiintuneen hyväksymisprosessin puuttuminen uudelleenkäytettävillä rakennusosilla on ollut uudelleenkäyttöä hidastava tekijä.

6. Yhteenveto

Suomessa puretaan noin 4000–5000 rakennusta vuodessa. Yleensä massaltaan suurin yksittäinen jätelaji on betoni, jonka tyypillinen hyötykäyttötapa on sen hyödyntäminen murskeena maarakentamisessa. Jotta rakennustoimiala pystyy saavuttamaan kunnianhimoiset ympäristötavoitteensa, tulee purkuhankkeiden resurssivirtoja tarkastella mielestämme uudestaan. Tämä edellyttää uudenlaista osaamista ja tekemistä koko purkuhankkeen hallinnassa ja korostaa huolellisten suunnitelmien ja ennakkotutkimusten roolia.

Uudelleenkäytön yleistyminen tulee vaikuttamaan purkusuunnitelmien sisältöön niin purkusuunnittelijan kuin -urakoitsijan näkökulmasta. Uudelleenkäytettävät osat tulee saada esiin, irrottaa, nostaa sekä kuljettaa siten, että niiden ominaisuudet eivät huonone jälleenkäytön näkökulmasta. Tämä edellyttää tiivistä kommunikaatiota tilaajan, urakoitsijan ja suunnittelijan välillä suunnitteluvaiheessa. Purkuhankkeissa tulee muodostaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa käsitys, mitä osia ja tuotteita halutaan irrottaa ja miten se vaikuttaa koko rakennuksen purkujärjestykseen ja -tekniikoihin. Purettujen rakennusosien käyttöön tarvitaan uudenlaisia toimijoita ja liiketoimintamalleja, jotta tämä prosessi vakiintuu.

Lähdeluettelo

- [1] Lehtonen, K. 2019. Purkutyöt - opas tekijöille ja teettäjiille. 84 s.
- [2] Hradil P, Talja A, Wahlström M, Huuhka S, Lahdensivu J, Pikkuvirta J. 2014. Re-use of structural elements Environmentally efficient recovery of building components. 69 s.
- [3] Wahlström M, Hradil P, Teittinen T, Lehtonen K. 2019. Purkukartoitus - opas laatijalle. 33s.
- [4] <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/kaytetyt-betonielementit-kokonaisina-osaksi-uuttataloa-kansainvalinen-suurhanke> viitattu 23.8.2021.
- [5] RTS EPD, Ympäristöseloste ontelolaatta. 11 s.
- [6] <https://ym.fi/rakennustuotteet> viitattu 16.8.2021.

Hiilijalanjälki ja energiatehokkuus korjausrakentamisen hankkeiden suunnittelussa

Mika Keskisalo, Mikko Matveinen ja Jari Kuusisto
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Rakentamisen säädöskehityksen kautta rakennusten elinkaaren hiilijalanjälkilaskenta on tulossa osaksi myös korjausrakentamisen hankkeiden suunnittelua ilmastaselvityksen muodossa. Optimaalisessa tapauksessa rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen tarkastelu tulisi suorittaa osana kohteiden suunnitteluprosessia. Karelia-ammattikorkeakoulun toteuttaman tapaustutkimuksen tavoitteena oli arvioida peruskorjauskohteen suunnitteluratkaisuja energiatehokkuuden, hiilijalanjäljen sekä kustannusten näkökulmasta yleisesti käytössä olevia suunnittelutyökaluja hyödyntäen.

Tapaustutkimus toteutettiin osana kolmekerroksisen asuinkerrostalon saneeraussuunnittelua peruskorjausvaiheessa. Toteutuksen vaiheet olivat (1) lähtötietojen kerääminen ja eri toteutusvaihtoehtojen valinta, (2) energiasimulointien teko, (3) elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi (LCA), (4) kustannuslaskenta (LCC) ja (5) tulosten arviointi ja vertailu. Skenaariot energiatehokkuuden, hiilijalanjäljen ja takaisinmaksuaikojen osalta laadittiin aluksi yksittäisille ratkaisuille ja myöhemmin tunnistettujen parhaimpien ratkaisujen yhdistelmille. Toteutettu tarkastelu toimii kohteen suunnitteluratkaisujen arvioinnin ja päätöksenteon tukena.

1. Johdanto

Rakentamisen säädöskehityksen kautta rakennusten elinkaaren hiilijalanjälkilaskenta on tulossa myös osaksi korjausrakentamisen hankkeiden suunnittelua [1]. Optimaalisessa tapauksessa rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen tarkastelu tulisi suorittaa osana kohteiden suunnitteluprosessia, jolloin eri suunnitteluratkaisuja voidaan arvioida kokonaisvaltaisesti [2,3]. Karelia-ammattikorkeakoulun Vähähiilinen ja energiatehokas korjausrakentaminen -projektissa toteutettiin tapaustutkimus, jonka tavoitteena oli yhdistää elinkaaren hiilijalanjäljenlaskenta osaksi suunnittelun aikaista energiaoptimointia ja kustannuslaskentaa.

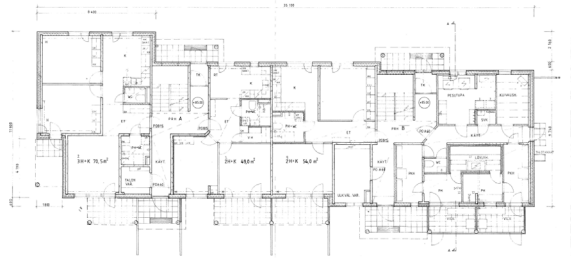
2. Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet

Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksia peruskorjausvaiheessa käytetyn energiankulutuksen sekä hiilijalanjäljen näkökulmasta. Arvioinnissa huomioitiin energiankulutuksen sekä peruskorjaustoimenpiteiden materiaalien aiheuttamat päästöt. Arviointi suoritettiin GWP- indikaattorin näkökulmasta huomioiden rakennuksen elinkaaren vaiheet A1-A5, B4-B6, C1-C4 sekä D. [4] Osatavoitteena oli lisätä hankeosapuolten tietoisuutta eri suunnitteluratkaisujen vaikutuksista.

2.1 Kohdetiedot

Tutkimuksen kohteeksi valikoitui Joensuun-Kodit Oy:n omistama 1987 valmistunut kolmekerroksinen asuinkerrostalo (972,0 b-m²) Joensuussa Tuulentiellä, jonka peruskorjaus on lähdössä toteutukseen loppuvuodesta 2021. Asuinhuoneistojen 15 kpl lisäksi rakennuksen

ensimmäisessä kerroksessa sijaitsee yhteiskäyttötilat, mukaan lukien sauna, pesutilat, pesutupa ja kuivaushuone. Käynti kerroksien välillä ja huoneistoihin tapahtuu rakennuksen keskiosassa sijaitsevien kahden hissittömän porrashuoneen kautta.



Kuva 1. Tapaustutkimuksen kohderakennus vasemmalla (kuva: Mikko Matveinen) ja oikealla pohjapiirros, 1 kerros [5]

2.1.1 Rakennustekniikka ja rakenteet

Rakennuksen pääasiallinen kantava sekä jäykistävä runko koostuu paikallavalurakenteisista teräsbetoniulko- ja väliseinistä. Seinien paksuus on kerroksien 1-3 osalta 160 mm liittyen paikallavaluholviin $h_l=190$ mm. Toissijaisena kantavana runkona toimii teräsbetoniseiniä lisäksi US- linjoilla sahatavararunko 50x125 k600 jaolla, johon välipohjan teräsbetoniholvi tukeutuu osittain pystykuormien osalta. Rakennusosien tarkemmat kuvaukset ovat luettavissa erillisestä kohderaportista [6].

Taulukko 1. Nykyisen rakenteen energiasimuloinnissa käytetyt U- Arvot sekä rakennusajankohtaa vastaavat U-arvot suluisissa [7]

Rakenneosa	U-arvo $W/(m^2K)$ (RakMk C3, 1985)
Ulkoseinä	0,28 (0,28)
Maanvarainen alapohja	0,36 (0,36)
Yläpohja	0,22 (0,22)
Ovi	1,42 (1,4)
Ikkuna	1,97 (2,1)

2.1.2 LVIA-järjestelmät

Tuloilma tulee huoneistoihin tuuletus- ja raitisilmaventtiilien avulla. Ilmanvaihtokanavistot, varusteet ja päätelaitteet ovat pääosin alkuperäisiä. Päätelaitteina toimivat lautasventtiilit ja kartioventtiilit. Rakennuksen porrashuoneissa on koneellinen poistoilmanvaihto, joka on toteutettu vesikatolla sijaitsevien poistoilman huippuimureilla. Huippuimurit eivät ole alkuperäisiä vaan ne on uusittu kertaalleen, mutta päätelaitteet ja varusteet ovat pääosin alkuperäisiä. Kiinteistön on liitetty kaukolämpöverkkoon ollen pääasiallinen lämmöntuottotapa ja lämmönjako toimii vesikiertoisen patterilämmityksen avulla. Kaukolämmön alajakokeskus on uusittu vuonna 2016, mutta verkoston linjansäätö- ja sulkuventtiilit ovat alkuperäisiä. Lämmitysjärjestelmä on kytketty alkuperäiseen SAVE- järjestelmään. [8,9]

3. Tutkimuksen toteutus

3.1 Lähtötietojen kerääminen ja toteutusvaihtoehtojen valinta

Lähtötietoina tehdyille toimenpiteille toimivat kohderakennuksen suunnitteludokumentit (ARK/RAK/LVIAS): alkuperäiset 2D-dokumentit, asiakirjat sekä näiden pohjalta tehty IFC inventointimalli. Lisäksi toteutuksen ensimmäisessä vaiheessa kerättiin lähtötietoja osana kohteen suunnittelutyöpajoja tyypillisistä suunnitteluratkaisuista, joita oli hyödynnetty aikaisemmin vastaavanlaisissa peruskorjauskohteissa. Nämä tiedot toimivat eri toteutus/laskentavaihtoehtojen rajaamisen apuna.

Lähtötiedot olivat osittain puutteellisia ja puuttuneet tiedot täydennettiin Ympäristöministeriön ohjeistusten mukaisesti ja pidettiin vakiona kaikissa simulointitapauksissa. Puutteellisista lähtötiedoista johtuen simulointien tulokset eivät aivan täysin vastaa todellista energiankulutusta, joten niitä on tarkasteltava suhteellisina arvoina verraten nykytilanteen simulointiin. Osa teknisistä ratkaisuista, kuten vakiopaineventtiili ja huoneistokohtainen ilmanvaihto, oli jo päätetty toteutettavaksi. Näiden ratkaisujen vaihtoehtoja ei ole tutkittu.

3.2 Energiasimulointien suorittaminen

Lähtötietojen pohjalta potentiaalisille suunnitteluratkaisuille suoritettiin energiasimulointi Riuska-energiälaskentaohjelmalla. Energiasimuloinnin tavoitteena oli selvittää rakennuksen energiankulutus nykytilanteessa ja verrata sitä erilaisiin energiatehokkuutta parantaviin ratkaisuihin. Simulointitapauksissa tutkittiin rakenteiden lämmönläpäisykertoimien, uusiutuvien energiamuotojen sekä ilmanvaihtoratkaisuiden vaikutusta E-lukuun, energian nettotarpeisiin ja ostoenergian tarpeeseen.

3.2.1 Simulointien lähtötiedot

Rakennuksen nykyisenä ilmanvuotolukuna voidaan tarkastelussa olettaa $q_{50}=2,5$ ($m^3/(hm^2)$), joka perustuu kohdetta hallinnoivan Joensuun Kotien kokemusperäiseen tietoon aikaisemmista kohteista. Kyseistä arvoa on käytetty Case 12 ja 18 osalta ja muiden case tapausten osalta ilmanvuotoluvun arvona $q_{50}=1,0$ ($m^3/(hm^2)$). Tiiveyskorjauksen toteutustavan oletuksena vahvikenauha yhdessä vedeneristystuotteiden kanssa järjestelmäkorjauksena, kun sisäpuolista lisälämmöneristämistä ei tehdä.

Rakennusosien tarkastelu on tehty käyttäen vaihtoehtoisina rakenteina yläpohjan (YP) osalta lisäeristystä puhallus sekä levyeristeellä (Isover lasivilla ja Paroc kivivilla ja puukuitupohjaisia Ekovillan puhallus- ja levyeristeitä (vaihtoehtojen tunnuksat R3-R8). Ulkoseinien osalta (US) tarkastelu on suoritettu sisäpuolisen lämmöneristysten osalta PIR- eristeelle, jossa vaihtoehtoisesti käytetty levyssä valmiina olevaa pintalevytystä (tunnus R1) tai sisäpuolista levytystä koolauksella (tunnus R2). Ikkunoiden vaihdon osalta peruskorjaustason tavoitteena U-arvo $1,0$ W/m^2K (tunnus R9). Nykyistä olemassa olevaa rakennetta kuvaa tunnus R0. Erittely nähtävissä taulukossa 3.

Taulukko 2. Rakennusosien ja TATE vaihtoehtoyhdistelmät sekä vaihtoehtojen kuvaukset

CASE	Ulkoseinä (US)	Yläpohja (YP)	Alapohja (AP)	Ikkunat	Ulko- o- vet	Aurinkopaneelit 3 MWh/a	Lämpöpumput x%/ x% sähkö
3	R0	R3-8	R0	R0	R0	EI	EI
4	R0	R3-8	R0	R9	R0	EI	EI
5	R0	R3-8	R0	R0	R0	KYLLÄ	EI
6	R0	R3-8	R0	R9	R0	KYLLÄ	EI
7	R0	R0	R0	R0	R0	EI	EI
8	R0	R3-8	R0	R0	R0	EI	85%/15%
9	R0	R3-8	R0	R0	R0	EI	95%/ 5%
11	R0	R3-8	R0	R9	R0	KYLLÄ	85%/15%
12	R0	R3-8	R0	R0	R0	EI	EI
13	R1-R2	R0	R0	R0	R0	EI	EI
14	R1-R2	R3-8	R0	R0	R0	EI	EI
15	R0	R0	R0	R9	R0	EI	EI
16	R1-R2	R3-8	R0	R9	R0	EI	EI
17	R0	R3-8	R0	R0	R0	EI	EI
18	R0	R0	R0	R0	R0	EI	EI
19	R0	R3-8	R0	R9	R0	EI	EI

Taulukko 3. Vaihtoehtojen tunnusten kuvaukset

Tunnus	Materiaali/ kokoonpano
R0	Nykyinen/vanha rakenne
R1	US-FF-PIR GYL (60+9)
R2	US-FF-PIR 50 mm+koolaus+GN12
R3	YP_V1-Paroc levyvilla
R4	YP_V2-Paroc puhallusvilla
R5	YP_V3-Isover levyvilla
R6	YP_V4-Isover puhallusvilla
R7	YP_V5-Ekovilla levyvilla
R8	YP_V6-Ekovilla puhallusvilla
R9	Ikkunoiden vaihto

Kohteessa olevalle painovoimaiselle ilmanvaihdolle on tarkastelussa käytetty lähtötilanteen osalta LTO yleensä 0 %, koska porraskäytävän huippumurissa ei saatujen tietojen mukaan ole lämmöntalteenottoa. Muille case tapauksille lämmöntalteenoton oletusarvona on käytetty LTO yhteistilat 60 %, asunnot 75 % ja porrashuoneet 60 %, joka vastaa markkinoilla saatavilla olevien ilmanvaihtokoneiden keskimääräistä LTO arvoa huoneistokohtaisten järjestelmien osalta. Järjestelmien SFP -lukuna (Specific Fan Power) on kaikissa muissa kuin lähtötilanteen case 18 tapauksessa (SFP 0 kW/(m³/s), käytetty; yhteistilat 0,92 kW/(m³/s), asunnot 1,92 kW/(m³/s), porrashuoneet 0,62 kW/(m³/s) ja ilmanvaihtojärjestelmien osalta 1,81 kW/(m³/s). [6]

3.3 Elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi (LCA)

Elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi suoritettiin GWP- indikaattorin näkökulmasta huomioiden rakennuksen elinkaaren vaiheet A1-A5, B4-B6, C1-C4 sekä D [1]. Arvioinnissa otetaan huomioon vain peruskorjausvaiheessa kohteessa käytettävien materiaalien ja tuotteiden aiheuttamat päästöt. Jo olemassa olevat/nykyiset rakenteet eivät sisälly arviointiin. Rakennuksen peruskorjauksessa aiheutuvien nykyisten materiaalien elinkaaren lopun (C- vaihe) päästöjä ei ole huomioitu.

LCA- arviointi suoritettiin käyttämällä One Click LCA -ohjelmaa. Tulokset on koottu jäljempänä esitettyihin taulukoihin sekä kuviin. Tulokset kuvaavat elinkaaren aikaisia vaikutuksia 50 vuoden rakennuksen käyttöiällä EU Level(s) [10] ja Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisesti [1]. Rakennuksen suunnittelun käyttöiän ollessa 50 vuotta (2036) ja odotetun käyttöiän 60 vuotta (vuosi 2046) saadaan odotetun elinkaariarvioinnin ajanjaksoksi 15 ja 25 vuotta. Tarkastelu ulotettiin myös 50 vuoden ajanjaksolle (vuosi 2071), jolla saadaan havainnollistettu skenaarioiden keskinäisten erojen tasoittumista. Tässä artikkelissa tarkastelussa tavoitekäyttöiälle 50 vuotta olevat tulokset.

Käyttövaiheessa (B6) verrataan vaikuttavien järjestelmien takaisinmaksuaikoja suhteessa säästettyihin päästöihin suhteessa järjestelmien valmistuksesta aiheutuviin A1-A3 vaiheen päästöihin sekä huoltoon ja ylläpitoon (B4-B5). Materiaalien ja tuotteiden osalta tarkastelu suoritetaan pääasiassa vaihdettavien ja kunnostettavien pintojen sekä rakenteiden osalta ilman maatyttöjen tai kaivujen vaikutuksia tontilla. Rakennusosien ja materiaalien hiilinieluja/hiilivarastoja ei huomioida GWP:tä alentavina tekijöinä, vaan ne tuodaan esille rakennuksen elinkaaren D vaiheessa. Materiaalimenekkien ja hukkien osalta arvioina on käytetty Ratu-kortistojen tietoja, joiden tarkempi kuvaus nähtävissä laskentaraportista.

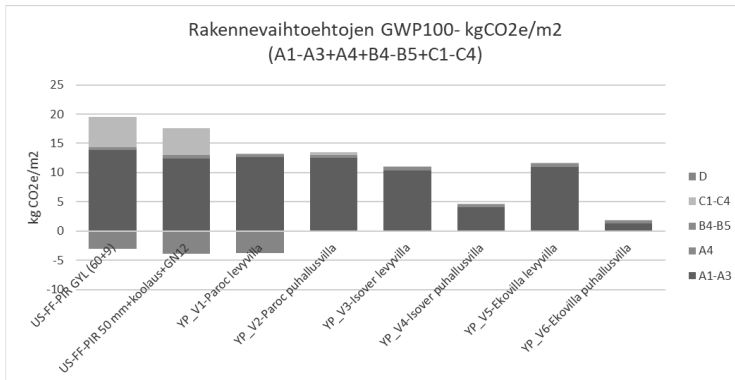
Rakennuksen elinkaaren B käyttövaiheen ja ”B6 Energian käyttö” osalta arviointi tehtiin suunnitteluasiakirjoista case tapauksille ostoenergian osalta. Ilmastonlämpenemispotentiaali (GWP) arvoina käytetään tarkastelussa ympäristöministeriön [1] ja OneClick LCA:n päästötietokantoja kaukolämmön ja verkkosähkön osalta. B6 vaihe arviointiin käyttäen alla olevia skenaarioita:

- Energiatuotannon päästöt pysyvät nykyisellä tasolla (2020).
- Ostoenergian osalta siirrytään vihreän verkkosähkön käyttöön (aurinko 10 %, vesi 30 %, tuuli 60 %), mutta kaukolämmön päästöt pysyvät nykyisellä tasolla (2020)
- Ostoenergian osalta siirrytään vihreän verkkosähkön käyttöön (aurinko 10 %, vesi 30 %, tuuli 60 %) ja kaukolämmön päästöjen oletetaan vähenevän (YM arviointimenetelmä) [1]
- YM arviointimenetelmän mukaiset energian päästöarvot [1]

4. Energiasimulointien, elinkaariarvioinnin (LCA) sekä elinkaarikustannusten (LCC) tulokset

Laskennassa huomioitiin skenaariokohtaiset energiaselvityksen sekä simuloinnin kautta saadut ostoenergian määrät, jotka yhdenmukaistavat kohteiden sääolosuhteet vastaamaan Jyväskylän säävyöhykkeen (vyöhyke III) vuoden 2012 säädäntä vertailuarvoja. Energiasimuloinneissa Case 18 toimii nykyisen rakennuksen energiatehokkuuden lähtötasona, johon nähden muita case tapauksia tullaan vertaamaan energiatehokkuuden, energiatodistusluokituksen (E- luku kWhE/m²) ja ostoenergian osalta (MWh/a). Simuloinnissa oletetaan, että taloteknisten järjestelmien mm. lämmöntalteenotto säilyy tarkasteluaikana samana. Lämmöneristeiden oletetaan myös säilyttävän asennushetkeä vastaavat tekniset ominaisuutensa eikä rakenteisiin aiheudu ilmavuotoja tai lämmöneristävyyttä heikentäviä tekijöitä tarkasteluaikajaksena. Ostoenergian osalta energiasimuloinneissa ei oleteta käytettävän jäähdytysenergiaa.

Kohderakennuksen osalta voidaan saavuttaa suurimmat A1-A3 tuotteiden päästöjen vähennykset käyttämällä uusiutuvia puukuituisia puhallusvillaeristeitä yläpohjan lisälämmöneristykseenä. Muita vaihtoehtoisia yläpohjan lisälämmöneristysmateriaaleja ovat mineraalivillapohjaiset (lasi- ja kivilla) eristeet. Vaihtoehtojen keskinäiset erot tasoittuvat kuitenkin neliökohtaisessa tarkastelussa kts. kuva 2.



Kuva 2. Rakennevaihtoehtojen GWP kg CO2e/ m2

Elinkaarikustannuksien osalta tarkasteluun on otettu tuotevaiheen osalta materiaalien kustannukset (A1-A3) sekä työmaatoimintojen panosten (A5) osalta työntekijäkustannukset. Työmaa-toimintojen energiankulutusta (A5) tai kuljetuskustannuksia (A4) ei ole huomioituna, mutta käyttövaiheen ostoenergian määrä (B6) on huomioitu. Elinkaaren käytönaikaisia kustannuksia kunnossapidon ja laajamittaisten korjausten osalta ei ole otettu mukaan tarkasteluun (B2-B5). Myöskään elinkaaren lopun purkuvaihetta (C1-C4) ei ole otettu tarkasteluun, koska se vaatisi tulevaisuuden skenaarioiden tarkempia yhdistelmiä. Kustannuslaskennan tulokset on esitetty tarkemmin raportissa: Elinkaariarvioinnin (LCA/LCC) ja energiasimuloinnin tulokset – Tuulentie 3, Talo A [4]. Päästöjen vähentämisen kannalta kaikista vähäisimmät investoinnit vaativa toimenpide olisi rakennuksen tiiveyden parantaminen ja yleisellä tasolla riippumatta skenaariosta vihreään sähköön siirtyminen. Keskeisimmät tulokset on kuvattu taulukossa 4.

LTO parannuksilla, tiiveyskorjauksella ja ilmanvuotoluvun parantamisella (case 7) on E lukua pienentävä vaikutus (-53 kWhE/m2/a), mutta pelkällä yläpohjan lisälämmöneristämällä saavutetaan sama vähennys yhdessä LTO parannuksen kanssa. Case tapausten välillä olevat eroavaisuudet ovatkin vain 53 kWhE/m2/a sisällä energiasimulointien osalta, kun käytetään ainoastaan rakennusosien teknisten ominaisuuksien parannuksia. Ainoan poikkeuksen muodostaa Case 5, joka huolimatta aurinkopaneelijärjestelmän sekä yläpohjan lämmöneristykseen lisäämisestä sijoittuu huomattavasti huonommin vertailussa muihin aurinkopaneelilla varustettuihin case tapauksiin (case 6 ja 11).

Pienin E-luvun vähennys saavutetaan case 8 (E-luku 109 kWhE/m2/a) tapauksessa, jossa lämpöpumppujen/ sähköön osuus on 85 %/15 %. Toisaalta yhdistämällä laajempia toimenpiteitä case 11 tapauksessa saavutetaan E- luvun osalta jo lähes puolet pienempi E-luku case 18 lähtötilanteeseen nähden (kts. Taulukko 4.). Suurimmat energiatehokkuutta edistävät toimenpiteet voivatkin nostaa energiatehokkuusluokituksen B luokkaan (esim. case 11), mutta yleisesti voidaan saavuttaa C luokka myös tiiveyskorjauksella (esim. case 4).

Tarkasteltaessa toteutusvaihtoehtojen investointikustannuksia suhteessa vähähiilisyys tavoitteisiin voidaan huomata, että case 11, 9 ja 8 saavuttavat suurimman vaikutuksen. Investointikustannusten suhdetta rakennuksen elinkaaren aikaisiin päästöihin tuleekin lukea käänteisesti €/ tkgCO2e arvoon nähden, jolloin suurimman arvon saanut vaihtoehto saa suurimman euromääräisen hyödyn tuotettuun päästötonniin nähden. Toisaalta takaisinmaksuaika vuoteen 2036 mennessä ei täyty laajempien toimenpiteiden osalta, mutta vuoteen 2046 mennessä se täytyy kaikilla vaihtoehdoilla. [6]

Toimenpidevaihtoehdot, jotka hyödyntävät TATE sekä aurinkopaneeleja saavuttavat vähäisemmät päästöt keskimäärin (case: 6, 8, 9 ja 11). Pelkkä aurinkopaneelin lisääminen ei kuitenkaan ole riittävä toimenpiteiden vaan tarvitsee rinnalle myös yläpohjan lisälämmöneristämisen sekä esim. ikkunoiden vaihdon. Case 18 lähtötilanteen osalta olisi se pelkästään vihreään sähkөөn siirtymällä vähähiilisempi päästöjen osalta myös ilman kaukolämmön tuotannon päästöjen vähenemistä. Vihreään sähkөөn siirtyminen keskitetysti ei ole kuitenkaan käytännössä toteutettavissa, koska asukkailla on oikeus valita mm. sähkötoimittajansa perustuen sähkömarkkinalakiin 588/2013 [10]. Toisaalta juuri käyttövaiheen B6 päästöjä saataisiin tehokkaimmin vähennettyä olemassa olevan rakennuskannan osalta vähentämällä energiantuotannon päästöjä.

Taulukko 4. Yhteenveto laskennan tuloksista

Case	E-luku	Hiilijalanjälki tkgCO ₂ e		Kustannus			
		2036 (A1-A3, A4, B4-B6)		Takaisinmaksuaika (Vuosisia a)		Investointi (€)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Case 3	109	218	221	2,0	2,6	19825	25935
Case 4	102	215	218	6,5	7,1	72130	78239
Case 5	105	218	221	14,5	15,1	26275	32385
Case 6	98	215	218	14,3	14,9	78580	84689
Case 7	112	226	226	1,3		11738	
Case 8	109	147	151	7,1	7,7	64885	70995
Case 9	99	135	138	6,0	6,6	64885	70995
Case 11	89	142	145	18,3	18,8	78580	84689
Case 12	112	225	229	0,9	1,5	8087	14197
Case 13	107	218	219	1,8	2,9	18259	25267
Case 14 (R1,R3-8)	104	211	214	2,5	3,0	26347	32456
Case 14 (R2,R3-8)		210	214	3,1	3,7	33355	39464
Case 15	105	223	223	5,0		52305	
Case 16 (R1,R3-8)	97	214	217	6,7	7,2	78651	84761
Case 16 (R2,R3-8)		213	217	7,3	7,8	85659	91768
Case 17	111	219	223	2,1	2,7	19825	25935
Case 18	165	366	366	-	-	-	-
Case 19	100	212	215	6,4	7,0	72130	78239

5. Yhteenveto

Tulosten ja saatujen kokemusten perusteella rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljenlaskenta on mahdollista toteuttaa luontevasti energiatehokkuustarkastelujen ja kustannuslaskennan yhteydessä osana jo alkuvaiheen suunnitteluprosessia. Saatujen tulosten perusteella toteutettu tarkastelu antaa sovellettavaa tietoa päätöksentekoon, mikäli rakennuksen elinkaaren päästöjä halutaan käyttää yhtenä suunnitteluparametrina energiatehokkuuden ja investointikustannusten rinnalla.

Energiankulutuksen (B-vaihe) ja tuotevaiheen (A-vaihe) valintojen optimoinnilla on mahdollisuus saada aikaan suurimpia GWP (kgCO₂e) vähennyksiä juuri peruskorjaushankkeen alkuvaiheessa, mutta hyödyt tasoittuvat pidemmällä tarkasteluajanjaksolla. Rakennuksen osalta TATE-järjestelmien päivittämisellä oli suurin vaikutus energiatehokkuuteen sekä elinkaaren hiilijalanjälkeen. Rakenteellisten parannusten osalta merkittävimpiä toimenpiteitä olivat rakennuksen tiiveyden sekä yläpohjan lämmöneristysten parantaminen. Aurinkoenergian hyödyntäminen kohderakennuksessa ei näyttäytynyt järkevältä ratkaisuna, sillä saatujen energia- ja ilmastohyötyjen lisäksi tarkastelussa otettiin huomioon myös rakennuksen arvioitu käyttöikä peruskorjauksen jälkeen.

Lähdeluettelo

- [1] Toim. Kuittinen, M. (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22, Helsinki.
Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>
- [2] Toim. Tiainen, K. (2020). Opas rakennushankkeiden päästöjen hallintaan. Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja B, Oppimateriaaleja ja kokoomateoksia: 67, Joensuu
Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-275-318-2>
- [3] Rintala, T., Huuhtanen, J. (2020). Rakentamisen ympäristöindikaattorit tontinluovutuksessa ja rakennushankkeiden kilpailutuksissa. Karelia-ammattikorkeakoulu, Joensuu
Saatavilla: <https://rakentaminen.karelia.fi/tutkimus/julkaisut/>
- [4] SFS-EN 15978:en. (2012). Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of building. Calculation method. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- [5] Työpiirustus ARK 22-101. (1986). Arkkitehtitoimisto Antti Torikka.
- [6] Elinkaariarvioinnin (LCA/LCC) ja energiasimuloinnin tulokset – Tuulentie 3, Talo A Karelia-ammattikorkeakoulu, Joensuu
Saatavilla: <https://rakentaminen.karelia.fi/tutkimus/julkaisut/>
- [7] RakMk C3. 1985. Lämmöneristys. Määräykset. Ympäristöministeriö.
- [8] Joensuun Kodit Oy, Tuulentie 3, RLVIS-kuntoarvio. (2021). WSP Finland Oy
- [9] Tarkastusraportti 54162, Tuulentie 3. (2021). Polygon Finland Oy
- [10] Dodd N., Donatello S. & Cordella M. (2021). Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP) user manual: introductory briefing, instructions and guidance (Publication version 1.1)
- [11] Sähkömarkkinalaki. 9.8.2013/588. Finlex.
Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

A9. Luonnonmukainen rakentaminen

Honkasuon Aarraitat – perinteisin rakentein ilmastonmuutosta vastaan

Minna Aarnio ja Jukka Reinikainen
Rakennusasiaintoimisto Aarre Oy

Tiivistelmä

Uudisrakentamisen aiheuttama hiilipiikki on vakava ongelma lähimpien vuosikymmenten aikana. Tästä syystä rakentamista on nopeasti muutettava siten, että aina kun mahdollista, rakennetaan hiiltä varastoiden.

Nyt kehitetty rakennuskonsepti nojaa voimakkaasti perinteisiin yksiaineisiin rakenteisiin, mahdollisimman yksinkertaiseen tekniikkaan sekä omaan uusiutuvan energian tuotantoon. Pilottihankkeen rakennusrungot veistetään käsin kotimaisesta puusta. Hirsien luonnolliset dimensiot ja ominaisuudet, painovoimaisen ilmanvaihdon edellytykset, tuulettuvat alapohjat, esteettömyys ja aurinkopaneelille optimaalinen kattokulma ovat oleellisesti ohjanneet konseptin arkkitehtuuria. Arkkitehtoninen tyyliisuunta on siksi leikillisesti ”*Bois brut*”, puubrutalismi.

Helsingin Honkasuolle toteutetaan vv. 2021-2022 konseptin pilottikohde, seitsemän asuntomoduulin rivitalo, asuntokohtaiset pihatalot ja yhteinen pihasauna. Jokaiselle asunnolle tulee oma aurinkovoimala ja ilmalämpöpumppu sekä puhdaspolttainen, varaava takka. Lämmitysjärjestelmänä on uusiutuva kaukolämpö ja energialuokka on A. Verrattuna tavanomaisiin rakennustyyppeihin (puu+tiili ja betoni) pilottihankkeen hiilijalanjälki on 150 vuoden tarkastelujaksolla 30-33% pienempi ja hiilikädenjälki 250-500% suurempi (puu+tiili ja betoni).

Pilottihankkeen hiilikädenjälki on tarkastelujakson pituudesta riippuen 35 – 235 % sen hiilijalanjälkeä suurempi

1. Johdanto

Vuoden 2018 IPCC:n ilmastoraportin jälkeen perustimme yrityksen kehittämään ja toteuttamaan mahdollisimman hiilitehokasta asutokonseptia. Tammikuussa 2019 EKO-SAFA:n seminaarissa ”Hiilinielut ja –varastot rakentamisen näkökulmasta” professori Seppo Junnila totesi, että pääkaupunkiseudulle ja kasvaviin kaupunkeihin tarvitaan uudisrakentamisen hiilipiikin taittamiseksi ”puukaupunkiseutuja” välittömästi, jotta uudisrakentamisen ilmastohaittoja saadaan pienennettyä.

2. Honkasuon Aarraitat – perinteisin rakentein ilmastonmuutosta vastaan

Uusi asutokonsepti koostuu omarunkoisista, kaksikerroksisista asuntomoduuleista, joiden massiivihirrestä veistettyjen seinien pituus on maksimissaan 8200 mm. Kantavien ulkoseinien massiivihirsi on 225 mm paksua. Asuntojen väliin jätetään 50 mm suljettu ilmarako, joten asuntojen väliset seinät ovat 500 mm paksut. Hirsiseiniä ei verhoilla, jotta massiivirakenteen energiahyötyjä ei menetetä. Jos Honkasuon hankkeessa ulkoseinät olisi verhoiltu tuulettulla lautaverhouksella, energialuokka olisi pudonnut A:sta B:hen, kun auringon lämpö ei olisi päässyt varautumaan suoraan massiivirakenteeseen.

Asuntomoduuleissa on tuulettuvat ullakko-ontelot harjakattojen alla. Moduulin keskellä on muurattu piippu, jossa on seitsemän poistoilmahormia ja yksi savuhormi. Asunnot varustetaan aurinkovoimaloin ja ilmalämpöpumpuin sekä varaavin, puhdaspolttoisin takoin.

Asuntojen alakerta on esteetön kaksio. Yläkerrassa on 1-2 huonetta, wc ja noin 25-30 m² laajentamismahdollisuus. Jokaiseen asuntoon kuuluva erillinen pihatalo lisää asumiseen joustoa. Asunnon autopaikka on varustettu sähköautojen latauspisteellä.

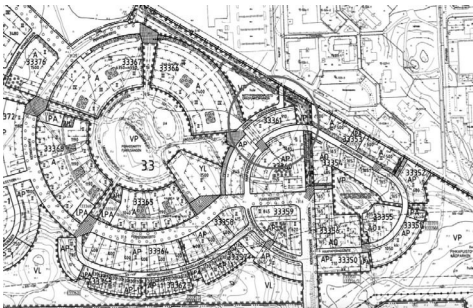


Kuva 1. Perinteinen lohenpyrstönurkka piharakennuksessa Haapaperhosentie 27 työmaalla 2021

2.1 Honkasuon puutaloalue Helsingissä

Helsingin kaupunki kaavoitti Honkasuon ekologisen puutaloalueen tiukoin ekokriteerein Vantaan rajan tuntumaan vuonna 2015. Vuonna 2019 vasta osa alueen tonteista oli rakennettu ja Helsingin kaupunki oli kiristänyt hiilitavoitteitaan, joten tavallisesta poikkeava konseptimme herätti kiinnostusta ja saimme pilottihankkeellemme tontin Haapaperhosentie 27, Helsinki.

2.2 Asemakaava



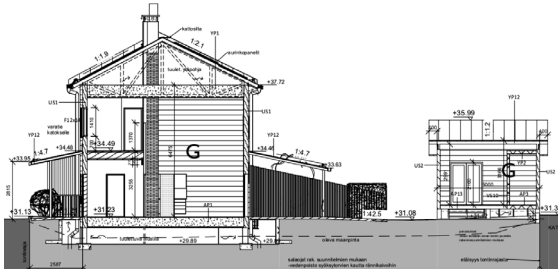
Kuva 2. Asemakaavakartta, Haapaperhosentie 27 ympyröity

Kaarevan tontin koko on 1769 m² ja tontilla on rakennusoikeutta 910 k-m². Kaavamerkintä AP II sallii kaksikerroksisen rivitalon ja talousrakennusten rakentamisen. Yhdistimme talousrakennusalat tontin eteläreunaan ja siirsimme asuntorakennusala vastavasti pohjoiseen, kadun reunan tuntumaan. Näin saimme aikaan suojaisen pihapiirin ja asunnoista käynnin suoraan kadulle.

2.3 Tontti ja perustukset

Tontti oli tasainen, esirakennettu, paljas murskekenttä metrin verran katutasen alapuolella. Tontin savisen maaperän vuoksi perustukset paalutettiin teräspaaluilla, joiden varaan valettiin betonista paaluanturat. Anturoiden päälle muurattiin betoniset valuharkkopilarit, joiden päälle hirsirungot pystytetään.

Määrysten mukaan asuntojen tulee olla esteettömiä ja tuulettuvan alapohjan alla pitää olla keskimäärin 80 cm vapaata ilmatilaa. Tämä olisi melkoinen suunnitteluhaaste, mutta tonttimme erikoinen maastovyvenys mahdollistaa molemmat. Katutasosta tullaan esteettömästi ensimmäiseen kerrokseen ja takaovesta pihalle. Tämä saa aikaan ”vallihaudan”, toki kuivan, jonka yli asuntoihin kuljetaan pieniä siltoja pitkin.



Kuva 3. Leikkauspiirustus

2.4 Rakennukset

Kunnianhimoisen uudisrakentamisen hiilipiikin torjumistavoitteen vuoksi kohteen kaikkien rakennusten runkomateriaaliksi valikoitui käsin veistetty kotimainen massiivihirsi. Hirsijulkisivut maalataan keittomaalein, sisällä hirsi on paljaana.

Jo konseptivaiheessa saimme selville, että massiivihirren käytännöllinen pituus on 8,2 m ja tästä tuli konseptin asuntomoduulin seinien maksimipituus. Jokaiselle asunnolle veistetään oma hirsirunkonsa, joten asuntojen väliset seinät ovat puoli metriä paksut. Tämä on asuntojen välisen äänieristyksen ja paloturvallisuuden kannalta hyvä rakenne ja mahdollistaa tarvittaessa myöhemmin moduulien siirtämisen ja uudelleenkäytön ja kierrätyksen, vaikka yksi kerrallaan.



Kuva 4. Pilottihankkeen asunnon C runkoa pystytetään 2021

2.4.1 Hirsimateriaali ja lämpöeristeet

Puut valittiin, ostettiin ja kaadettiin talvella 2018-19, jo kauan ennen kuin meillä oli tontista saati rakennusluvasta tietoa. Tämä onkin yksi massiivihirsirakentamisen prosessin erikoisuus, hyvin etupainotteinen aikataulut ja rahoitus.

Kahden asunnon hirret ovat mäntyä, viiden asunnon kuusta. Järeä kuusi osoittautui veistämön kenttäkokeissa paljon mainettaan paremmaksi. Asuntorunkojen hirret ovat paksuudeltaan 225 mm ja pihatalojen 150 mm. Hirsien välissä on pellavanauha. Tuulettuvan alapohjan ja yläpohjan eristemateriaalina on puukutteri, jonka lambda-arvo on 0,0429 W/mK.

2.4.2 Paloturvallisuus

Puurakennusten palomääräysten vuoksi niiden käytännöllinen kerrosluku on kaksi. Massiivihirsi on paloturvallinen materiaali eikä sitä tarvitse palosuojata, kun etäisyys- ja korkeusvaatimuksia noudatetaan. Asuntomodulien väliset ullakko-ontelot osastoidaan levyrakenteella luokkaan EI30.

2.4.3 Ilmanvaihto, lämmitys ja jäähdytys, aurinkoenergia

Ilmanvaihtojärjestelmäksi valikoitui painovoimainen, jotta ilmanvaihto voi toimia myös ilman koneita ja koska se sopii hyvin yhteen perinteisen massiivihirsirakenteen kanssa. Valittu ilmanvaihtojärjestelmä vaikutti suoraan huonekorkeuksiin (vähintään 2,6 m), tilojen sijoitteluun suhteessa keskushormistoon, ikkunoiden kokoon ja sijaintiin sekä lämmönjakomenetelmään. Ikkunoiden alla on vesikiertoiset lämpöpatterit, jotka lämpiävät uusiutuvalla kaukolämmöllä.

Pilottihankkeen asuntoihin tulee puhdaspolttoiset varaavat takat. Helteisen kesän jälkeen tuntuu hyvältä, että asuntoihin tulee sekä suuret asuntokohtaiset aurinkovoimalat että ilmalämpöpumput, joilla voi jäähdyttää ja kuivattaa kesällä omaa aurinkosähköä käyttäen.



Kuva 5. Pilottihankkeen asunnon A piippua muurataan 2021. Piippu pinnoitetaan savilaastilla.

2.4.4 Loft -henkeä

Osa toisesta kerroksesta jätetään ”säästöön”, asuntojen sisäisille laajennuksille jätettiin rakennusoikeutta. Nyt rakennettavat asunnot ovat kooltaan noin 79 m² ja sisältä laajennettavissa noin 107 m²:iin. Sisällä hirsipinnat jätetään käsittelemättä, samoin puulattiat ja -katot. Keittiöt varustellaan minimitasoon, jotta niiden muuttaminen ja täydentäminen ei aiheuttaisi tarpeetonta jätettä kalusteita mieleisemmiksi vaihdettaessa.



Kuva 6. Ensimmäisen kerroksen pohjapiirros

2.4.5 Pihatalot

Tontin eteläreunaa rajaavat asuntokohtaiset pihatalot, jotka rakennetaan 150 mm paksusta massiivihirrestä. Pihatalot ovat ulkomitoiltaan 3 x 5 m. Piharakennusjonon itäpäässä on yhteinen pihasauna. Koska pihataloilla ei ole asuntojen vaatimuksia, niissä pystyttiin käyttämään kunnostettuja kierrätysikkunoita.

2.5 Hiilivaikutukset

Honkasuon pilottihankkeen hiililaskelmat teetettiin ulkopuolisella konsultilla loppuvuodesta 2020. Ilmastolle haitallisen hiilijalanjälkivaikutuksen pilottihankkeelle laskettiin ilmaston kannalta myönteinen hiilikädenjälki.

Asuntokohtaisten aurinkovoimaloiden (á 16 paneelia) tuotto on 5,9 kWp, sähkönsyöttö verkkoon 5,385 kWh/a ja vältetyt CO₂-päästöt 2523 kg/a, yhteensä 17,7 tonnia vuodessa. [2]

2.5.1 Hiilijalanjälkilaskelman tulokset [1]

50 vuoden tarkastelujaksolla Honkasuon pilottihankkeen hiilijalanjälki on **371** tonnia CO_{2e}. Tulosta huonontaa aurinkopaneelien valmistamisen ja kuljetuksen hiilijalanjälki. Tulos on lähellä tavanomaisia rakennustyyppisiä (puurunko+tiiliverhous 302 tonnia CO_{2e} tai betonirunko 339 tonnia CO_{2e}).

150 vuoden tarkastelujaksolla Honkasuon pilottihankkeen hiilijalanjälki on **726** tonnia CO_{2e}, puu+tiili -runkoisen vaihtoehdon 1041 tonnia CO_{2e} ja betonirunkoisen vaihtoehdon 1082 tonnia CO_{2e}.

Pilottihankkeen hiilijalanjälki on 50 vuoden tarkastelujaksolla hieman suurempi mutta 150 vuoden tarkastelujaksolla noin kolmanneksen pienempi kuin vertailurakennustyypeillä.

2.5.2 Hiilikädenjälkilaskelman tulokset [1]

Honkasuon pilottihankkeen hiilikädenjälki osoittautui odotuksiakin suuremmaksi. Se on 3,5 kertainen verrattuna puu+tiili –rakennustyyppiin ja melkein kuusinkertainen verrattuna betonirakennustyyppiin.

50 vuoden tarkastelujaksolla Honkasuon pilottihanke varastoi **879** tonnia hiiltä (CO_{2e}.)
Betonirunkoinen vastaava kohde varastoi 153 tonnia ja puu+tiili -runkoinen 249 tonnia CO_{2e}.
150 vuoden tarkastelujaksolla Honkasuon pilottihanke varastoi **966** tonnia hiiltä, betonirunkoinen toteutusvaihtoehto varastoi hiiltä 174 tonnia ja puu+tiili -runkoinen 271 tonnia.

Honkasuon pilottihankkeen hiilikädenjälki 50 ja 150 vuoden tarkastelujaksolla (-879/966 tonnia CO_{2e}) on 35 - 236% suurempi kuin sen hiilijalanjälki (371/726 tonnia CO_{2e}).

3. Yhteenveto

Rakentamisen säädökset mahdollistavat enemmän kuin on totuttu olettamaan. Perinteisillä suomalaisilla materiaaleilla ja rakennetyypeillä on mahdollista rakentaa ilmastoystävällisesti ja terveellisesti. Käsini veistetty massiivihirsi on hyvä vaihtoehto myös tulevaisuuden rakennusmateriaaliksi. Modulaarisella konseptilla saadaan aikaan joustavia ja muunneltavia kokonaisuuksia.

Hiiltä tehokkaasti varastoiva rakentaminen on mahdollista jo nyt käytettävissä olevia, tuttuja materiaaleja ja rakennetyyppejä soveltaen. Kun luonnollisen materiaalin ja valitun talotekniikan (tai sen puuttumisen) reunaehdot huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa, varsinkin kaksikerroksisen, tiiviin rakentamisen mahdollisuudet ovat erinomaiset.



Kuva 7. Aarreaittojen työmaa Haapaperhosentie 27, Helsinki 2021

Lähdeluettelo

- [1] Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy, Mikko Keinänen, Andrei Dementiev, Jenni Venäläinen 2021. Asunto Oy Haapaperhosen Aarre – Elinkaaren hiilijalanjäljen tarkastelu 22.1.2021
- [2] Helen Oy, Santtu Bäckström - Haapaperhosentie 27 tuotannon simulointi 13.8.2021

Polttamattomat savituotteet osana vähähiilistä ja terveellistä puurakentamista

Mikael Westermarck

Tiivistelmä

Polttamattomien savirakennustuotteiden valmistus on nopeasti yleistynyt mm. Keski-Euroopassa niiden oletusarvoisesti vähähiilisuuden ja terveellisuuden takia. Näiden tuotteiden valmistus kiinnostaa myös suomalaisia yrityksiä ja savea käytetään jo omatoimirakentamisessa Suomessa. Esitän tässä alustavat hiilisisältöjen laskelmat näille rakennustuotteille, niistä ja kantavasta puurakenteista koostuville kerrostalon rakenneosille sekä vertaan niitä tavanomaisiin puukerrostalon rakenneosiin. Listaan myös niitä polttamatonta savea sisältävien rakenteiden rakennusfysikaalisia ominaisuuksia, joilla voi olla terveysvaikutuksia.

1. Johdanto

EU ja siinä mukana Suomi on valmistelemassa rakentamisen vähähiilisuuden ohjausmenetelmiä ja tarkasteluun on otettu ennen kaikkea rakennuksen elinkaaren alku- ja loppupää eli rakennusmateriaalien valmistus, rakentaminen, rakennusjätteen synnyn ehkäisy ja kierrätys. Polttamattoman saven, kuten muidenkin luonnonmukaisten aineiden, prosessointi rakennusaineiksi vaatii vähän energiaa ja uusiutumattomia raaka-aineita, moneen muuhun rakennusaineeseen nähden. Arvioin tässä esityksessä minkälainen rooli polttamattomilla savirakennustuotteilla voisi olla uudessa vähähiilisessä rakentamisessa.

Saven väitetyistä terveysvaikutuksista sisäilmaan on vain vähän tutkimustietoa, joten listaan tässä esityksessä niitä rakennusfysikaalisia ominaisuuksia, joilla voi olla terveysvaikutuksia.

Polttamattomien savirakennustuotteiden valmistus on nopeasti yleistynyt mm. Keski-Euroopassa ja näiden tuotteiden tutkiminen sekä edelleen kehittäminen olisikin tärkeitä erityisesti näiden tuotteiden valmistusta harkitseville suomalaisille yrityksille, mutta myös omatoimirakentajille.

2. Vähähiilisyys

Hiilijalanjälkiä ja -kädenjälkiä eli hiilisisältöjä lasketaan eurooppalaista ympäristövaikutusten laskentastandardia 15804 soveltaen [5]. Tekniset ominaisuudet ja hinta lasketaan usein rakennusosan neliometriä kohden, joten on luontevaa laskea ja verrata myös hiilisisältöjä yhtä neliometriä kohden. Jatkossa esittelen 7 savituotteen ja niistä sekä kantavasta puurungosta koostuvien 4 kerrostalon rakennusosan hiilisisällöt, jotka on laskettu uudella arviointiohjelmallani, sekä vertaan niitä tavanomaisiin puukerrostalon rakenneosiin.

2.1 Raaka-aineiden hiilisisältöjä

Koordinoin Teknillisen korkeakoulun arkkitehtiosastolla Luonnonmukaisen rakentamisen tutkimusyksikössä (1993-2003) kaksivuotisen Unburnt Clay Building Products (UCBP) EU – projektin. Tässä projektissa tutkittiin VTT:n toimesta mm. polttamattomien savituotteiden ympäristövaikutuksia [1], joten sieltä saadaan tarvittavia raaka-aineiden hiilisisältöjä sekä raaka-aineiden kuljetuksesta ja käsittelystä aiheutuvia päästötietoja, jotka luonnollisesti tarkentuvat tuotteiden valmistuksen alkaessa. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan materiaaliin sitoutuvan biogeenisen hiilen määrää, eli kuinka paljon kasvien hiiltä varastoituu materiaaliin.

Taulukko 1. Raaka-aineiden hiilisisältöjä.

Raaka-aine	Tarkennus *3	Hiilisisältö kgCO ₂ e/kg		
		Jalanjälki	Kädenjälki	Lähde
Savi	Kaivuuätteestä lähtien	-		VTT *1
Savi	Kaivettu tuotantoa varten	0,0014		VTT *1
Hiekka		0,0012		VTT *1
Höylälästu	Sahan ylijäämästä lähtien	0,0090	-1,55	Ehta eriste
Puukuitu	Jätepaperista lähtien	0,0460	-1,55	VTT *1
Lastuvilla	Sahan ylijäämästä lähtien	0,0260	-1,55	VTT *1
Pieni pyöreä puu	Puunkaato, kuorinta ja katkaisu pölkyiksi	0,0920	-1,55	YM *2
Ruisjauho		0,5000	-1,55	A1 Syke, Kädenkäiki arvio
Olki	Viljan puinnista lähtien	0,0046	-1,55	A1 VTT *1, Kädenjälki arvio
Hampun päistäre	Hampun puinnista lähtien	0,0046	-1,70	A1 VTT *1, Kädenjälki HAL archives
Pellava/Juuttikuitu		0,1000	-1,55	A1 VTT *1, Kädenjälki arvio

*1: VTT Rakennustekniikka 15.11.2000, Unburnt Clay Building Products, Environmental impact Report

*2: YM, Rakennusten hiilijalanjäljen arviointityökalu 9.12.2019

*3 Päästöt elinkaaren alusta lähtien, jos ei muuta mainita

2.2 Polttamattomien savituotteiden hiilisisältöjä

Savikomposiittien valmistuksesta aiheutuvia alustavia päästötietoja saadaan UCBP raportista, ja tiedot tarkentuvat tuotteiden valmistuksen alkaessa.

Taulukko 2. Savikomposiittien tuotannon hiilipäästöjä

Tuotannon päästöt	Sähkö	Raskasöljy	
	kWh/kg	MI/kg	kgCO ₂ e/kg
Suulakepuristus	0,06		0,0262
Koneellinen kuivaus		1,4	0,1134
Valmistus muoteissa	0,0033		0,0014
Ilmakuivaus		0	0

Raaka-aineiden hiilisisältöjen avulla voidaan laskea tuotteiden hiilisisällöt, kun tunnetaan materiaalimenekit. Taulukossa 4 esiteltujen 7:n tuotteen hiililaskelmat on esitetty Polttamattomien savirakennustuotteiden hiilisisältöjä -selvityksessä [2].

Taulukko 3. Esimerkki tuotteiden hiililaskelmasta.

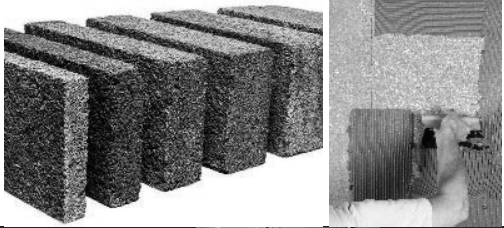


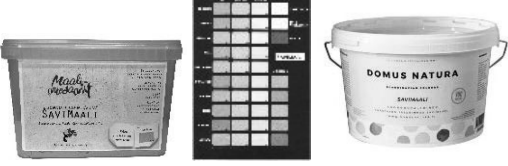

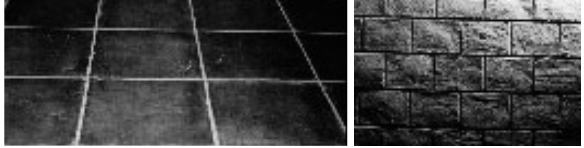

Savi-hampunpäistäreharkko		Tiheys, kg/m ³	Korkeus, m	Leveys, m	Syvyys, m	Paino	Lämmönjohtavuus, W/mK			
		430,00	0,2	0,3	0,35	9,03	0,074	*2		
Tuotteen hiilisisältö kgCO ₂ e/kg			Hiilijalanjälki A1-A3			0,0070	Hiilikädenjälki	-0,561		
			A1	A2	A3	Yhteensä -0,5540				
			0,0015	0,0040	0,0014					
Raaka-aine	Tarkennus	Tuotteen koostumus kuiva-ainepitoisuuksina	Raaka-aineen hankinta		Raaka-aineen kuljetus	Tuotteen valmistus		Biogeenisen hiilen sisältö		
			kgCO ₂ e/kg raaka-ainetta	kgCO ₂ e/kg tuotetta	Arvio *1	kgCO ₂ e/kg raaka-ainetta	kgCO ₂ e/kg tuotetta	Polttoarvo MI/kg	kgCO ₂ e/kg raaka-ainetta	kgCO ₂ e/kg tuotetta
Savi	Kaivuuätteestä lähtien *1	67 %	0	0						0
Hampun päistäre	Hampun puinnista lähtien	33 %	0,0046	0,00152				20	-1,7	-0,561
Tuotanto		1 tai 0	*1			0,0014	0,001	*3		
Sekoitus ja valmistus muotissa		1								

*1: VTT Rakennustekniikka 15.11.2000, Unburnt Clay Building Products, Environmental impact Report

*2: Hanffaser Ucermark eG

*3: HAL archives

Taulukko 4. Polttamattomat rakennussavituotteet ja niiden hiilisisällöt

<p>Savi-hampunpäistäreharkko Raaka-aineet: Savi, Hampunpäistäre Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,007, Kädenjälki - 0,561, Yhteensä -0,554</p>	
<p>Savi-höylälasteriste Raaka-aineet: Savi, Höylälasteri Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,1231, Kädenjälki - 0,6665, Yhteensä -0,5434</p>	
<p>Massiivisavivalu Raaka-aineet: Savi, Hiekka Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,0053, Kädenjälki 0, Yhteensä 0,0053</p>	
<p>Savimaali Raaka-aineet: Savi, Puukuitu, Ruisjauho, Pigmenti Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,0318, Kädenjälki - 0,1395, Yhteensä -0,1077</p>	
<p>Savi-kuiturappaus Raaka-aineet: Savi, Hiekka, Puukuitu Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,0082, Kädenjälki - 0,0775, Yhteensä -0,0693</p>	
<p>Savi-kuitulevy Raaka-aineet: Savi, Puukuitu, Kauran kuori jauho, Olki Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,1470, Kädenjälki - 0,465, Yhteensä -0,3180</p>	
<p>Pölkky-saviharkko Raaka-aineet: Savi, Hiekka, Puukuitu, Pieni pyöreä puu, Olki Tuotteen hiilisisältö kgCO₂e/kg: Jalanjälki 0,0444, Kädenjälki - 0,713, Yhteensä -0,6686</p>	

2.3 Rakenteiden hiilisisältöjä

Edellä mainittujen savituotteiden hiilisisältöjen arvojen avulla voidaan laskea näistä tuotteista ja kantavasta puurakenteesta koostuvien kerrostalon rakennusosien yhden neliömetrin arvot ja

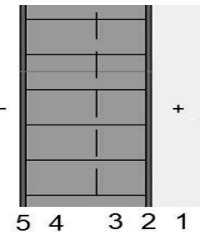
verrata näitä tavanomaisiin puukerrostalon rakennusosien arvoihin. Rakennusosat on pyritty yhdenmukaistamaan, niiden palo-, ääni ja lämmöneristävyysominaisuuksien osalta, mutta savituotteiden osalta joudutaan vielä osittain arvioimaan ominaisuuksia.

Muiden kuin savituotteiden arvot ovat pääosin peräisin Suomen ympäristökeskuksen päästötietokannasta [3] www.co2data.fi -sivulta ja Ympäristöministeriön Rakennusten hiilijalanjäljen arviointityökalusta [4]. Laskelmissa ei ole huomioitu tuotteiden kuljetuksesta tai rakennustyöstä aiheutuneita päästöjä eikä materiaalihukkaa. Lähtökohtana on myös, ettei tuotteita tarvitse vaihtaa rakenteissa.

Laskelmat on tehty erikseen ulkoseinälle, väliseinälle, välipohjalle ja yläpohjalle.

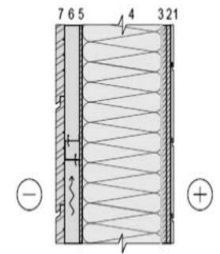
Taulukko 5. Ulkoseinärakenteiden vertailua.

Materiaali	Paksuus mm	Tarkennus	Yritys/yhteisö /lähde	Rakenteen hiilisisältö kgCO ₂ e/m ²			
				Järjestys	Jalanjälki A1-A3 *	Kädenjälki	Yhteensä
Ulkoseinä, luonnonmukainen rakenne							
Savimaali	1,0		Oma laskelma	1	0,05	-0,22	-0,17
Savirappaus	25,0		Oma laskelma	2	0,36	-3,37	-3,01
Puupilari 250x250, k 4000	430,0	Liimapuu	CO2data	3	0,87	-10,73	-9,86
Savi-hampunpäistäre harkko		430 mm	Oma laskelma	4	1,24	-99,97	-98,73
Kalkkirappaus	25,0		Keracol. Biocalce	5	12,40	0,00	12,40
Yhteensä	481				15	-114	-99



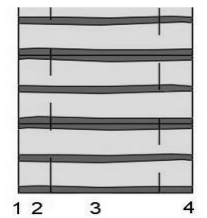
Ulkoseinä, tavanomainen puurakenne

Maali	0,1	akrylaatti, sisä	CO2data	1	0,35	0,00	0,35
Kipsilevy 2 krt	26,0	Normaali	CO2data	2	5,40	0,00	5,40
Höyrynsulku muovi	0,2	PE	CO2data	3	0,63	0,00	0,63
Puurunko 50x270, k600			CO2data	4	0,96	-17,06	-16,10
Mineraalivilla eriste	270,0	Normaali	CO2data	5	11,14	0,00	11,14
Kipsilevy, tuulensuoja	9,5	9,5 mm	CO2data	6	2,48	0,00	2,48
Palokatko metallinen k 3000	48,0	Pinnoitettu.	Ruukki Oy	7	0,71	0,00	0,71
Puukoolaus 48x48 k 600			CO2data	8	0,21	-3,79	-3,58
Julkisivulauta	28,0		CO2data	9	1,19	-21,24	-20,04
Maali	0,1	akrylaatti, ulko	CO2data	10	0,36	0,00	0,36
Yhteensä	382				23	-42	-19
Luonnonmukaiseen rakenteeseen verrattuna					157 %	37 %	19 %



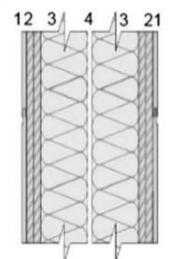
Taulukko 6. Väliseinärakenteiden vertailua.

Materiaali	Paksuus mm	Tarkennus	Yritys/yhteisö /lähde	Rakenteen hiilisisältö kgCO ₂ e/m ²			
				Järjestys	Jalanjälki A1-A3 *	Kädenjälki	Yhteensä
Väliseinä, luonnonmukainen rakenne							
			Ilmaaäneristävyys tutkittava				
Laastisaumojen savimaalaus	1,0		Oma laskelma	1	0,05	-0,22	-0,17
Pölkky-saviharkko + savilaas	400,0	400 mm	Oma laskelma	2	10,61	-170,48	-159,87
Puupilari 250x250, k 4000		Liimapuu	CO2data	3	0,87	-10,73	-9,86
Laastisaumojen savimaalaus	1,0		Oma laskelma	1	0,05	-0,22	-0,17
Yhteensä	402				12	-182	-170



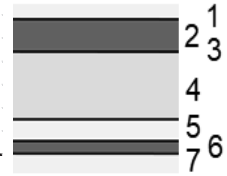
Väliseinä, tavanomainen puurakenne

Sisämaali	0,1	akrylaatti, sisä	CO2data	1	0,35	0,00	0,35
Kipsilevy	13,0	Normaali	CO2data	2	2,70	0,00	2,70
Mineraalivilla	100,0	Normaali	CO2data	3	4,13	0,00	4,13
Puurunko 50x100 kk600			CO2data	4	0,35	-6,29	-5,94
Ilmarako	50,0			5			
Puurunko 50x100 kk600			CO2data	6	0,35	-6,29	-5,94
Mineraalivilla	100,0	Normaali	CO2data	7	4,13	0,00	4,13
Kipsilevy	13,0	Normaali	CO2data	8	2,70	0,00	2,70
Sisämaali	0,1	akrylaatti, sisä	CO2data	9	0,35	0,00	0,35
Yhteensä	276				15	-13	2
Luonnonmukaiseen rakenteeseen verrattuna					130 %	7 %	-1 %



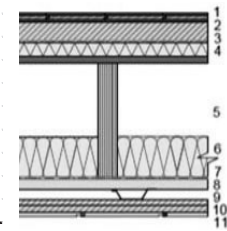
Taulukko 7. Välipohjarakenteiden vertailua.

Materiaali	Paksuus mm	Tarkennus	Yritys/yhteisö /lähde	Järjestys	Rakenteen hiilisisältö kgCO ₂ e/m ²		
					Jalanjälki A1-A3 *	Kädenjälki	Yhteensä
Välipohja, luonnonmukainen rakenne							
Vaha	0,1	Pellavaöljy.	YM	1	0,18	0,00	0,18
Savivalu	65,0		Oma laskelma	2	0,60	0,00	0,60
Polypropeenikangas	0,2	Vario Extra. 0,22	Isover	3	0,47	0,00	0,47
CLT	240,0		CO2data	4	22,56	-180,48	-157,92
Koolaus 25x50 k400	25,0		CO2data	5	0,000	-0,005	-0,005
Savikuitulevy	30,0		Oma laskelma	6	4,32	-13,67	-9,35
Savimaali	1,0		Oma laskelma	7	0,05	-0,22	-0,17
Yhteensä	361				28	-194	-166



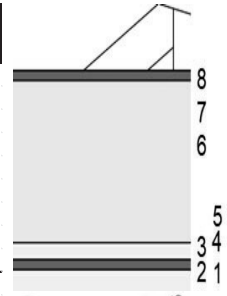
Välipohja tavanomainen puurakenne

Parketti	14,0	puuparketti	CO2data	1	9,41	-17,02	-7,61
Betonivalu	50,0		YM	2	15,50	0,00	15,50
Mineraalivilla, kova	30,0	Kova	CO2data	3	3,60	0,00	3,60
Vaneri 15 mm	15,0	havuvaneri	CO2data	4	2,70	-12,00	-9,30
Puupalkki 65x350 k 400	360,0		CO2data	5	2,43	-43,13	-40,71
Mineraalivilla 100 mm		Normaali	CO2data	6	3,77	0,00	3,77
Ilmansulkupaperi	0,2	Norm. kartonki	Cartesar, Greenç	7	0,04	-0,07	-0,03
Lauta	25,0		CO2data	8	1,07	-18,96	-17,89
Metalliset jouset	25,0	Pinnoitettu.	Ruukki Oy	9	0,71	0,00	0,71
Kipsilevy 2krt	26,0	Normaali	CO2data	10	5,40	0,00	5,40
Maali	0,1	akrylaatti, sisä	CO2data	11	0,35	0,00	0,35
Yhteensä	545				45	-91	-46
Luonnonmukaiseen rakenteeseen verrattuna					160 %	47 %	28 %



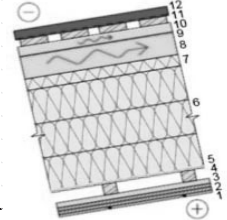
Taulukko 8. Yläpohjarakenteiden vertailua.

Materiaali	Paksuus mm	Tarkennus	Yritys/yhteisö /lähde	Järjestys	Rakenteen hiilisisältö kgCO ₂ e/m ²		
					Jalanjälki A1-A3 *	Kädenjälki	Yhteensä
Yläpohja, luonnonmukainen rakenne							
Savimaali	1,0		Oma laskelma	1	0,05	-0,22	-0,17
Savi-kuitulevy	30,0		Oma laskelma	2	4,32	-13,67	-9,35
Koolaus 75x50 k400	75,0		CO2data	3	0,40	-7,13	-6,73
Puukuitulevy	3,0	kova	CO2data	4	0,71	-4,79	-4,09
Ilmansulkupaperi	0,2	Norm. kartonki	Cartesar, Greenç	5	0,04	-0,07	-0,03
Puurunko osa vesikattorakennetta				6			
Savi-höylälasteriste	700,0		Oma laskelma	7	9,05	-48,99	-39,94
Puukuitulevy tuulensuoja	12,0	Huokoinen	CO2data	8	1,08	-4,20	-3,12
Yhteensä	821				16	-79	-63



Yläpohja tavanomainen puurakenne

Maali	0,1	akrylaatti, sisä	CO2data	1	0,35	0,00	0,35
Kipsilevy 2krt	26,0	Normaali	CO2data	2	5,40	0,00	5,40
Koolaus 75x50 k400	75,0		CO2data	3	0,40	-7,13	-6,73
Puukuitulevy	3,0	kova	CO2data	4	0,71	-4,79	-4,09
Höyrynsulkuvuovi	0,2	PE	CO2data	5	0,63	0,00	0,63
Puurunko osa vesikattorakennetta				6			
Mineraalivilla	500,0	Normaali	CO2data	7	22,50	0,00	22,50
Yhteensä	604				30	-12	18
Luonnonmukaiseen rakenteeseen verrattuna					192 %	15 %	-28 %



2.4 Jätteen synnyn ehkäisy ja kierrätys

Savituotteilla on ainutlaatuinen mahdollisuus uusiokäyttöön, sillä ne voidaan liottaa vedellä ja käyttää uudestaan rakennusaineena. Tuotteiden biogeeninen hiili voidaan myös sitouttaa maaperään varsinkin viljelysmaahan ja näin lisätä maahan kaivattua kasviainesta. Hiililaskelmien kädenjälki on siis todellinen, eikä varastoitu hiili palaudu ilmakehään, ja näin savirakennustuotteet tulisivat osaksi päästökauppaa.

3. Terveysvaikutukset

Polttamattomien savituotteiden mahdollisuutta luoda terveellistä sisäilmaa tulisi tutkia ainakin seuraavien fysikaalisiin ominaisuuksien osalta:

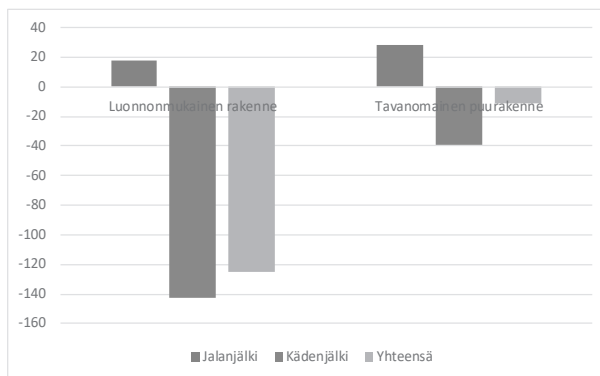
- Hygroskooppisuus ja sisäilman kosteuden tasapainotuskyky. Rakennusmateriaalien käytännön kosteuden puskuroiden mukaan niitä voidaan asettaa luokkiin erinomainen, hyvä, kohtuullinen ja välttävä. Esimerkiksi betoni ja tiili ovat luokassa välttävä, kipsi ja koivu luokassa kohtuullinen ja kuusi luokassa hyvä. UCBP –projektin mukaan massiivisaven ominaisuudet ovat tiilen luokkaa ja hygroskooppisuus lisääntyy biomateriaalipitoisuuden lisääntyessä. Tämän tarkentaminen olisi mielenkiintoinen tutkimusaihe vaikkapa opinnäytetöihin.
- Kapillaarisuus ja kyky pitää siksi ulkovaipan rakenteita kuivana sekä näin vähentää homeutumiskärsiä. Yksi Ekosafe 2 projektin tutkimusaiheista.
- Kyky stabiloida mikrobien VOC kaasuja ja hajuja esim. tupakka. Myös Ekosafe 2 projektin tutkimusaiheita. Vihdin betoni tekee aiheesta kirjallisuuskartoitusta.
- Kyky tasapainottaa huonetilan lämpötilan vaihteluita (massiivisavinen välipohja- ja väliseinäerakenteet). Tämä on tärkeä ominaisuus jo Keski- ja Etelä-Euroopassa sekä ilmastomuutoksen vuoksi kohta Suomessakin. Tavanomaisten kevyiden puukerrostalon rakenteiden lämpökapasiteetti on pienehkö, eikä betonituotteet ole ratkaisu siihen hiiliniukassa rakentamisessa.

4. Johtopäätökset

Laskelmien perusteella hiiliniukoilla tavanomaisilla puurakenteilla on keskimäärin noin 60 % suuremmat hiilijalanjäljet ja vain noin 30 % hiilikädenjäljistä luonnonmukaisiin rakenteisiin verrattuna. Hiilisisällöt (samoin kuin hinnat) tarkentuvat tuotannon alettua, mutta suuruusluokka on jo nähtävissä. Polttamattomien savirakennustuotteiden kehittäminen ja käyttö osana puurakentamista avaa mahdollisuuden hiililoikkaan ja entistä terveellisempään sisäilmaan.

Taulukko 9. Rakenteiden hiilisisältöjen vertailua.

Rakenteiden keskiarvot	Rakenteen hiilisisältö kgCO ₂ e/m ²		
	Jalanjälki	Kädenjälki	Yhteensä
Luonnonmukainen rakenne	18	-142	-125
Tavanomainen puurakenne	28	-39	-11
Vertailu	161 %	28 %	9 %



Lähdeluettelo

- [1] Häkkinen, T. VTT Rakennusteknologia. 2000. Espoo. Unburnt Clay Building Products, UCBCPs Environmental impact. 37 s.
- [2] Westermarck, M. 2021. Polttamattomien savirakennustuotteiden hiilisisältöjä. 19 s.
- [3] Suomen ympäristökeskuksen päästötietokanta www.co2data.fi. 2021
- [4] Ympäristöministeriön Rakennusten hiilijalanjäljen arviointityökalu. 2019
- [5] Sustainability of construction works - Environmental product declarations, EN 15804, 2012

Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden olosuhteissa.

Antti Forss, Teemu Jokela ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa käsitellään kutterinlastu- ja purueristeiden kosteus- ja lämpötekniistä toiminnan laskentatarkastelujen tuloksia valikoiduissa alapohja-, yläpohja ja seinärakenteissa.

Laskentatarkasteluissa mineraalivilla osoittautui soveltuvan hyvin tuulensuojamateriaaliksi purutuotteilla eristetyille rakenteille. Tulokset osoittivat, että mineraalivillatuulensuojalevyn avulla pystyttiin toteuttamaan kuivumiskykyisiä diffuusioavoimia rakenneratkaisuja, jotka toimivat kosteusteknisesti myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Puukuitutuulensuojalevyllä varustetut purutuotteilla eristetyt rakenteet eivät osoittautuneet kovin kuivumiskykyisiksi. Laskentatarkasteluissa ilmeni, että kuivumisongelmat korostuvat erityisesti suuremmilla eristevaipan paksuuksilla. Tulosten mukaan tuuletustilallisen harjakattoisen yläpohjarakenteen tapauksessa puukuitulevyn kosteuskapasiteetista on kuitenkin hyötyä rakenteen kosteustekniseen toimintaan.

1. Johdanto

Tässä artikkelissa rakennusosista käsitellään seinärakenteet, yläpohja ja alapohja. Seinärakenteissa tarkastelun kohteena on puuverhottu ja tiiliverhottu seinärakenne. Yläpohjarakenteissa tarkastellaan tuuletustilallinen yläpohja ja vino tuuletusvälillinen yläpohjarakenne. Alapohjarakenteissa tarkastelussa on ryömintätalallinen alapohja.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää jokaiselle tutkittavalle purutuotteilla eristetyille rakennustyypeille materiaaliyhdistelmiä, jotka ovat sisäpinnaltaan diffuusioavoimia sekä toimivat hyvin tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa kosteus- ja lämpötekniisesti. Tässä tutkimuksessa rakenteiden tulokset esitetään pääosin 2100 vuoden ilmasto-olosuhteissa, sillä ilmastomuutoksen eteneminen on kiihtynyt ja on havaittu, että vuoden Jokioisten 2015 sää oli jo osittain yhtä rasittava rakenteille kuin ennustettu Jokioisten 2050 sää. Tässä tutkimuksessa rakenteiden kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa tutkitaan Tampereen teknillisellä yliopistolla kehitetyllä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmällä.

Purutuotteiden kosteus- ja lämpötekniisiä ominaisuuksia on tutkittu laboratorioissa ja koerakentein sekä Tampereen teknillisen yliopistolla [12,13] että Teknillisellä korkeakoululla Otaniemessä [3,6]. Kutterinlastun materiaaliarvoina tässä tutkimuksessa käytettiin Tampereen teknillisen yliopistolla tehdyn tutkimuksen pohjalta muokattuja arvoja [13]. Lähtöoletus tässä artikkelissa esiintyvälle kutterinlastun lämmönjohtavuuden arvolle on otettu Ehta kutterinlastueristeen arvosta 0.042 W/(mK) [1]. Ecosafe-hankkeen aikana tehtävien materiaalikokeiden tulokset eivät olleet käytössä tätä tutkimusta tehtäessä.

Tämä artikkeli on tehty Forssin diplomityön [2] pohjalta, joka oli osana Tampereen yliopistossa tehtävää Ecosafe-Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset purueristeiset puurakenteet

tutkimushanketta, jossa selvitetään purueristeiden kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta laskentatarkasteluilla ja kenttäkokeilla. Tutkimus on saanut rahoitusta ympäristöministeriöltä. Tutkimuksen laskennat toteutettiin Delphin rakennefysiikkaohjelmalla. Laskentatarkasteluissa hyödynnettiin Tampereen yliopiston Narvi-laskentaklusteria ja tulokset käsiteltiin Python-koodien avulla, mitkä nopeuttivat tuloksien läpikäymistä paljon.

2. Tarkasteltavat rakenteet ja tarkasteluperiaatteet

Tämän tutkimuksen laskentatarkastelut tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Frame-hankkeessa viimeistellyllä analysointimenetelmällä [10], jossa rakennemallien kosteustekniistä toimivuutta tarkastellaan nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Frame-hankkeesta ja kosteusanalysointimenetelmästä voi lukea lisää Tampereen yliopiston internetsivulta. [10; 11] Forssin diplomityössä [2] tiiliverhotuilla rakenteilla käytettiin Vantaan eteläisen ilmasuunnan sääaineistoja ja kaikilla muilla rakennetyypeillä Jokioisen pohjoisen ilmansuunnan sääaineistoja. Seinärakenteilla tuuletusvälissä käytettiin dynaamista ilmanvaihtuvuutta, jonka Jokela oli määrittänyt diplomityössään [4]. Ryömintätilaisilla alapohjarakenteilla ilmanvaihtuvuuden arvoa ei käytetty laskennoissa vaan ryömintätilan olosuhteet laskettiin empiirisillä kaavoilla [9]. Muilla rakennetyypeillä käytettiin vakio ilmanvaihtuvuuden arvoja. Tämän lisäksi laskentatarkasteluissa otettiin huomioon ilmakehän pitkäaaltainen säteily, joka on määritetty artikkelissa [5]. Laskentatarkastelujen tarkemmat lähtötiedot ja määrittelyt löytyvät Forssin diplomityöstä [2]. Tutkimukseen toimintakriteeriksi valittiin homeen ja mikrobin kasvu. Homeen kasvun rajana rakenteiden eristetilaan liittyvissä rakenteissa on tässä tutkimuksessa homeindeksin maksimiarvo 1. Homeindeksin arvo lasketaan materiaalien risteyskohdassa homehtumisheremmän materiaalin mukaan.

Laskentatarkasteluissa tehtiin valintaa tuulensuojan, lämmöneristeen ja sisäpinnan materiaalien välillä. Lisäksi käytettiin muita vaihtuvia laskentaparametreja. Rakennetyypit ja eri materiaalivalinnat on esitetty kuvissa 1 ja 2. Kuvissa on myös esitetty Delphin laskentamallin merkityt laskentapisteet, joista olosuhdetiedot on poimittu. Tiiliverhottua rakennetta ei tässä artikkelissa käydä tarkemmin läpi. Tiiliverhotun ulkoseinä ja muiden rakenteiden tarkemmat laskentatarkastelut voi lukea diplomityöstä [1]



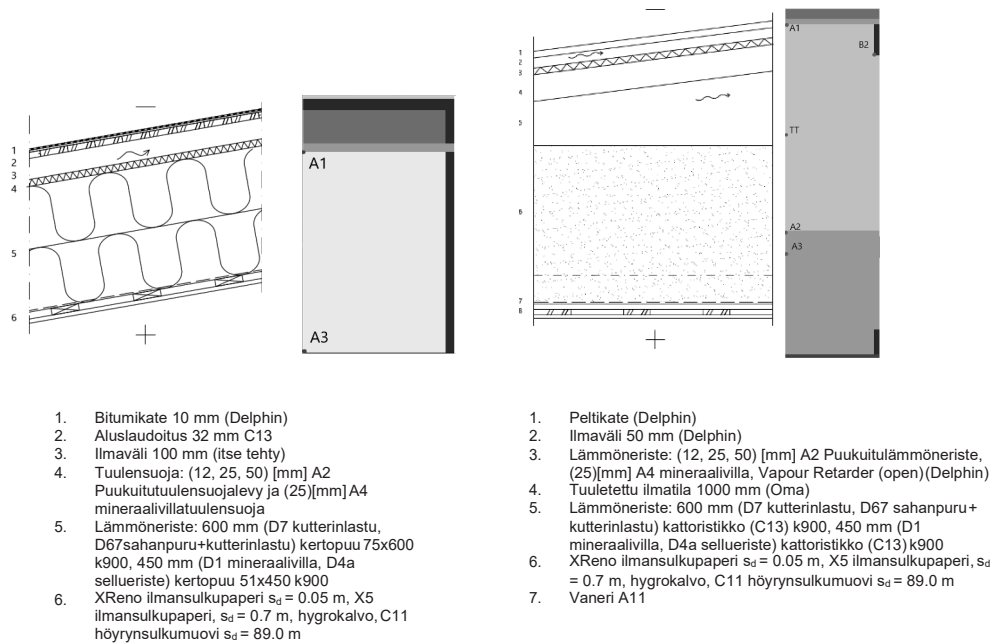
1. Pintakäsittely
2. C13 Ulkoverhouslauta 23 mm
3. Tuuletusväli 32 mm (Delphin ohjelmasta)
4. Tuulensuoja: (12, 25, 50, 75) [mm] A2 Puukuitutuulensuojalevy ja (25, 50) [mm] A4 mineraalivillatuulensuoja
5. Lämmöneriste 300 mm, levyuumatolppa 300 mm k600: (D7 kutterinlastu, D1 mineraalivilla, D4a sellueriste
6. XReno ilmansulkupaperi $s_d = 0.05$ m, X5 ilmansulkupaperi, $s_d = 0.7$ m, hygrokalvo, C11 höyrynsulkumuovi $s_d = 89.0$ m
7. A11 Vaneri 18 mm, ei vaneria

1. Lattialauta (C13) 25 mm
2. vaneri (A11) 21 mm
3. XReno ilmansulkupaperi $s_d = 0.05$ m, X5 ilmansulkupaperi, $s_d = 0.7$ m, hygrokalvo, C11 höyrynsulkumuovi $s_d = 89.0$ m
4. Lämmöneriste: 300 mm ja 400 mm (D7 kutterinlastu, D67 sahanpuru + kutterinlastu) puu (C13) 51x250 k600, 250 mm (D1 mineraalivilla, D4a sellueriste) puu (C13) 51x250 k600
5. Tuulensuojalevy: (25, 50) [mm] A2 Puukuitutuulensuojalevy, (25, 50) [mm] A4 mineraalivillatuulensuoja
6. Ryömintätila > 800 mm
7. Kapillaarisen veden nousun estävä kerros

Kuva 1. (a) Puuverhotut rakennetyypit

(b) Ryömintätilainen alapohja

[2]



Kuva 2. (a) Vino yläpohjarakenne

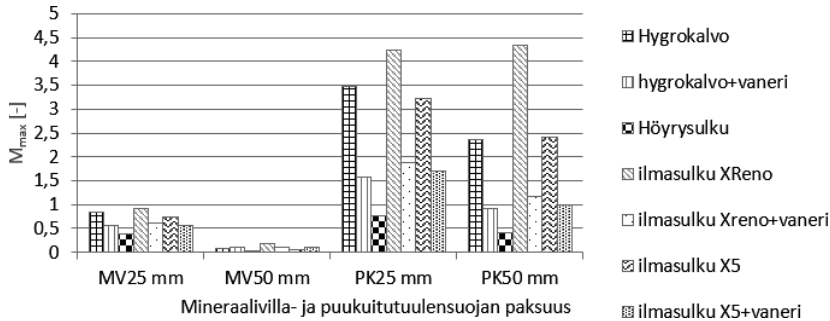
(a) Tuuletustilallinen yläpohjarakenne [2]

2.1 Seinärakenteet tulokset

Seinärakenteiden rakennetyypeiksi valikoituivat puuverhottu (Kuva 1.(a)) ja tiiliverhottu rakennetyyppi [1]. Rakennetyyppien tulokset on saatu eristealueen keskeltä tuulensuojalevyn sisäpinnasta (piste D) lasketuista arvoista. Tähän pisteeseen muodostui kriittisimmät olosuhteet homeen kasvun kannalta, kun eristemateriaalien olivat homeutumisherkkyysluokassa 1. Laskennat on tehty pääosin kahden vuoden simulaationa, josta homeindeksin laskentaan on valittu viimeisen vuoden tasaantuneet arvot. Tiiliverhotun rakenteen homeindeksit nousivat hyvin korkeiksi Vantaan 2100 vuoden säätilassa, kuitenkin tuulensuojalevyn paksuutta kasvattamalla päästiin niukasti alle yhden maksimihomeindeksin arvon. Tiiliverhottujen rakenteiden laskentatarkasteluista voi lukea lisää Forssin diplomityöstä. [2]

Kuvassa 3 on esitetty Jokioisen 2100 säätilassa eri tuulensuoja- ja sisäpinnanmateriaaleilla varustetun kutterinlastulla eristetyn rakenteen maksimi homeindeksit. Kuvasta havaitaan, että puukuitutuulensuojalla varustetut rakenteet eivät toimi kosteusteknisesti niin hyvin kuin mineraalivillalla varustetut. Puukuitutuulensuojalla varustettu rakenne toimii hyvin, kun sisäpinnan diffuusiovastus on tarpeeksi korkea, kuten silloin kun sisäpinnassa on höyrysulku tai vaneri ja hygrokalvo. Muilla rakenneyhdistelmillä, jotka päästävät enemmän vesihöyryä läpi, homeindeksien maksimi-arvot ovat yli 1:n. Korkeammat maksimihomeindeksien arvot puukuitutuulensuojalevyllä varustetuilla rakenteilla johtuvat siitä, että sen lämmönjohtavuus on ko. tilanteessa liian pieni, jolloin lämpötila ei nouse eristekerroksen ulkopinnassa tarpeeksi korkeaksi sitoakseen ylimääräistä kosteutta huokosilmasta. Puukuitutuulensuojalevyn diffuusiovastuskerroin on myös suuri, mikä estää kosteuden kuivumisen, erityisesti hygroskooppisilla materiaaleilla. [2]

25 mm:n mineraalivillatuulensuojalevyn paksuudella päästiin alle 1:n homeindeksin arvoihin kaikilla rakenneyhdistelmillä. 50 mm:n tuulensuojan paksuudella homeindeksit ovat jo hyvin pieniä jokaisella rakenneyhdistelmällä. Tämä on seurausta pienestä lämmönjohtavuuden ja diffuusiovastuksen arvosta. Nämä mineraalivillatuulensuojan edut oli huomattu jo Otaniemessä tehdyissä tutkimuksissa [3,6]. [2]

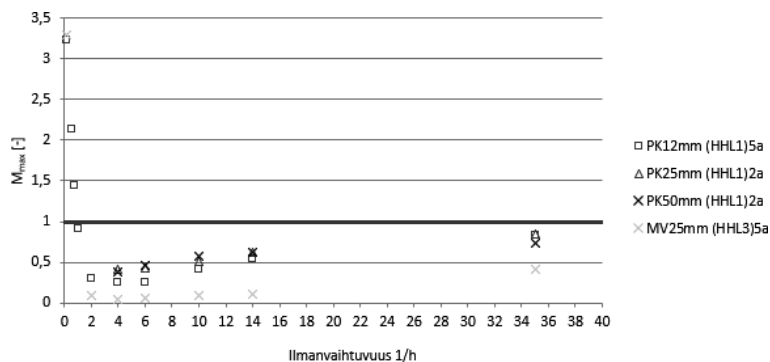


Kuva 3. Eri tuulensuojalevyillä varustettujen kutterinlastulla (HHL1) (lämmönjohtavuus 0.042 W/(mK)) eritettyjen puuverhottujen ulkoseinärakenteiden homeindeksien maksimi-arvot eri sisäpinnan materiaaleilla, Jokioisten 2100 vuoden säässä. Rakennetyyppi esitetty kuvassa 1(a). Olosuhdetiedot poimittu tuulensuojalevyn sisäpinnasta, pisteestä D. [2]

2.2 Yläpohjarakenteiden tulokset

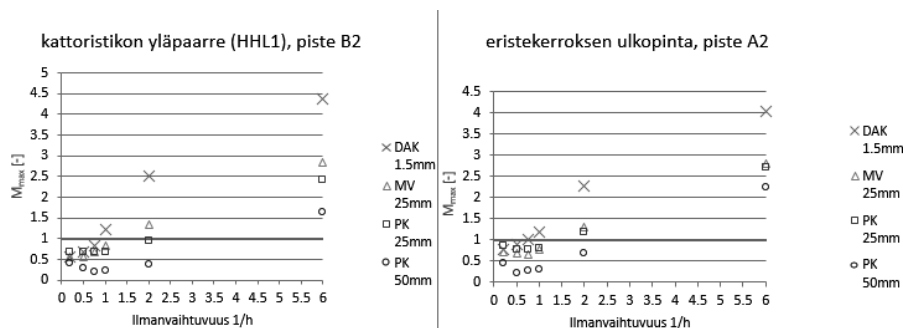
Kuvan 4 vinon yläpohjarakenteen tuloksista voidaan havaita, että puukuitutuulensuojalevyn paksuuden kasvattaminen ei merkittävästi paranna kutterinlastulla eristetyn rakenteen kosteusteknistä toimintaa ilmanvaihtuvuuden välillä 2-14 l/h, vaan homeindeksien arvot kasvavat. Parhaat tulokset tällä ilmanvaihtuvuuden välillä saadaan 12 mm:n levyn paksuudella. Tästä voidaan päätellä, että 12 mm:n puukuitulevyllä varustetulla rakenteella on hyvä kuivumiskyky ja näin ollen myös kosteusvarmuutta. Suuremmilla ilmanvaihtuvuuden arvoilla 50 mm:n puukuitutuulensuojalevyllä varustetun rakenteen homeindeksien maksimi-arvot ovat pienempiä kuin ohuempien levyjen (12 mm, 25 mm) kohdalla. Homeindeksit eivät parane ratkaisevasti puukuitutuulensuojalevyn paksuutta kasvattamalla, mikä on seurausta erityisvaipan pienestä lämmönläpäisykertoimesta ja puukuitutuulensuojalevyn tähän tilanteeseen liian suuresta diffuusiovastuskertoimesta sekä lämmönjohtavuudesta. Lämmöneristeen suurempi lämmönvastus laskee eristetilan ulkopinnan lämpötilan niin matalaksi, että tilanteeseen liian suuren lämmönjohtavuuden omaava puukuitutuulensuojalevy ei ratkaisevasti kasvata eristetilan ulko-osan lämpötilaa, vaikka olisi apua rakenteen kuivumisessa ja kosteuden sitomisessa. Tämän lisäksi puukuitutuulensuojalevyn diffuusiovastus estää paksuuden lisääntyessä paksun eristekerroksen kuivumisen.[2]

25 mm:n mineraalivillatuulensuojalla varustettu rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin laajalla ilmanvaihtuvuuden alueella. Tämä on seurausta pienestä lämmönjohtavuuden ja diffuusiovastuksen arvosta. Sen avulla saadaan rakennettua sopiva kuivumispotentialiaali ilmavälin ja eristekerroksen välille niin, että paksunkin eriste-vaipan kosteus pääsee kuivumaan. [2]



Kuva 4. Eri tuulensuojamateriaaleilla varustetun kutterinlastulla (HHL1, lämmönjohtavuus 0.042 W/(mK)) eristetyin vinon yläpohjarakenteen homeindeksien maksimi-arvot eri ilmanvaihtuvuuksien arvoilla, Jokioisten 2100 vuoden säässä. Rakenteen sisäpinnan ilmansulkukalvona on X5 ilmansulkupaperi. Rakennetyyppi esitetty kuvassa 2(a). Olosuhdetiedot poimittu tuulensuojalevyn sisäpinnasta, pisteestä A1. [2]

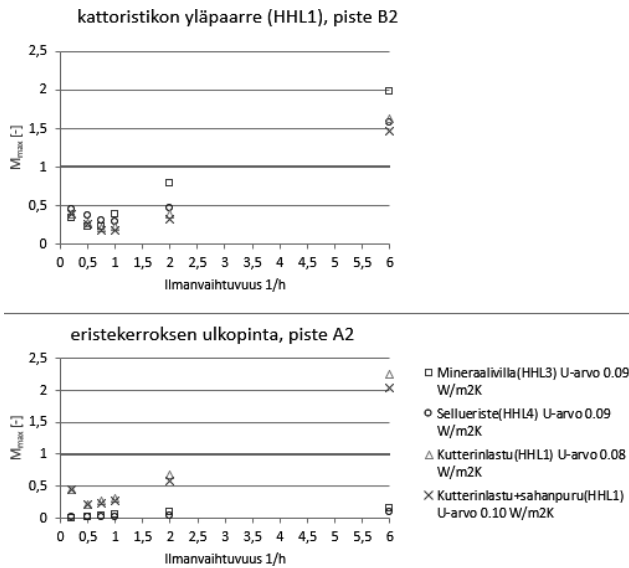
Puukuitueristelevyn (PK) lisääminen tuulettujen tilojen yläosaan paransi rakenteen kosteusteknistä toimintaa. 25 mm:n levyin paksuudella homeindeksien maksimi-arvot laskivat jo alle 1:n yläpaarteissa ja eristekerroksen ulkopinnassa. Yleisesti käytössä olevalla diffuusiovoimella aluskatteella (DAK) varustettu rakenne ei toiminut laskentatarkasteluissa kosteusteknisesti hyvin millään ilmanvaihtuvuuden arvolla. Kuvassa 5. (vas.) nähdään myös, kuinka yläpuolisen lämmöneristeen kosteuskapasiteetti vaikuttaa yläpaarten homeindeksin arvoon laskevasti suuremmilla ilmanvaihtuvuuden arvoilla (>1 (1/h)), vaikka 25 mm:n mineraalivillalämmöneristeen (MV) lämmönvastus on korkeampi kuin vastaavan puukuitulämmöneristeen. Eristekerroksen pinnassa ero ei kuitenkaan käytännössä enää ole. 50 mm:n puukuitulämmöneristeen paksuudella rakenteet toimivat hyvin laajalla ilmanvaihtuvuuden alueella, mikä johtuu tuulensuojalevyn korkeasta kosteuskapasiteetista ja tilanteeseen sopivasta lämmönvastuksesta.[2]



Kuva 5. Eri tuulettujen tilojen yläosan materiaaleilla varustetun kutterinlastulla (HHL1, lämmönjohtavuus 0.042 W/(mK)) eristetyin harjakattoisen tuulettu tilallisen yläpohjarakenteen homeindeksien maksimi-arvot, eri ilmanvaihtuvuuden arvoilla, Jokioisten 2100 vuoden säässä. Rakenteen sisäpinnan materiaaleina ovat X5 ilmansulkupaperi ja vaneri. Rakennetyyppi esitetty kuvassa 2(b).

Kuvasta 6. voi nähdä lämmöneristeen kosteuskapasiteetin vaikutuksen tuuletustilan yläosan olosuhteisiin: Mineraalivillalla eristetyyn rakenteen homeindeksit nousevat korkeammiksi tuuletustilan yläosassa, kun eristeen pinnan etäisyys yläpaarteesta on noin 1000 mm. Sellueristeenkin kosteuskapasiteetti riittää laskemaan homeindeksejä yläpaarteessa lähelle purutuotteiden homeindeksien arvoja.[2]

Kuvasta 6 havaitaan, että 50 mm:n puukuitulämmöneristeellä varustetut rakenteet toimivat yleisesti kaikilla eristemateriaaleilla. Eristemateriaalin homeutumisherkkyysluokan arvolla on kuitenkin suuri merkitys, mikä voidaan havaita mineraalivillalla ja sellueristeellä tehdyistä laskentatarkasteluista.[2]



Kuva 6. 50 mm:n puukuitulämmöneristelevyllä varustetun eri lämmöneristemateriaaleilla eristetyyn tuuletustilallisen yläpohjarakenteen homeindeksien maksimiarvot, eri ilmanvaihtuvuuden arvoilla, Jokioisten 2100 vuoden säässä. Rakenteen sisäpinnan materiaaleina ovat X5 ilmansulkupaperi ja vaneri. Rakennetyyppi esitetty kuvassa 1(a).

2.3 Alapohjarakenteiden tulokset

Taulukossa 1. on esitetty ryömintätilan kosteuslisän avulla alle yhden olevien homeindeksien maksimiarvojen määräytyminen eri materiaalien ja niiden paksuuksien yhdistelmillä. Painovoimaisesti tuuletuvan ryömintätilan kosteuslisän arvot vaihtelevat todellisissa rakenteissa, mutta kosteuslisän tavanomaista määrää voidaan arvioida aiempien tutkimusten [6-8] avulla. Näiden tutkimusten mukaan ryömintätilan kosteuslisä vaihteli syklisesti niin, että kosteuslisän keskiarvo oli välillä 0,5 g/m³...1,5 g/m³. Taulukosta 1. nähdään, että tuulensuojalevyn paksuutta kasvattamalla ja ryömintätilan kosteuslisää rajoittamalla on mahdollista parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. [2]

Taulukko 1. Eri tuulensuojilla varustetulla ja purutuotteilla eristetyn tuulettuvan ryömintätilaisen alapohjarakenteen alle 1:n homeindeksin maksimiarvot, ryömintätilan ulkoilmaan vertautuvan kosteuslisän avulla ilmaistuna., Jokioisten vuoden 2100 säässä. Rakenteen sisäpinnan materiaaleina ovat X5 ilmansulkupaperi, vaneri ja lattialauta. Rakennetyyppi esitetty kuvassa 1(b). Olosuhdetiedot poimittu tuulensuojalevyn sisäpinnasta (piste A3).[2]

Puukuitu- ja mineraalivillatuulensuojan paksuus				
ryömintätilan kosteuslisä g/m ³ (Δv): silloin, kun homeindeksin maksimiarvo <1	Puukuitu (HHL2) 25 mm	Puukuitu (HHL2) 50 mm	Mineraalivilla (HHL3) 25 mm	Mineraalivilla (HHL3) 50 mm
Kutterinlastu 300 mm (HHL1)	0 < Δv < 0.51 [g/m ³]	0 < Δv < 1.15 [g/m ³]	0 < Δv < 0.30 [g/m ³]	0 < Δv < 1.35 [g/m ³]
Sahanpuru + kutterinlastu 300 mm (HHL1)	0 < Δv < 0.65 [g/m ³]	0 < Δv < 1.29 [g/m ³]	0 < Δv < 0.46 [g/m ³]	0 < Δv < 1.63 [g/m ³]
Kutterinlastu 400 mm (HHL1)	0 < Δv < 0.37 [g/m ³]	0 < Δv < 1.0 [g/m ³]	0 < Δv < 0.37 [g/m ³]	0 < Δv < 1.16 [g/m ³]
Sahanpuru + kutterinlastu 400 mm (HHL1)	0 < Δv < 0.47 [g/m ³]	0 < Δv < 1.08 [g/m ³]	0 < Δv < 0.47 [g/m ³]	0 < Δv < 1.29 [g/m ³]

3. Yhteenveto

Tässä artikkelissa ja Forssin diplomityössä esiteltyjen laskentatarkastelujen ja aikaisempien tutkimusten mukaan ilmastonmuutoksen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan on merkittävä. Tästä johtuen laskentatarkastelut suoritettiin osin Vantaan ja Jokioisten 2100 ilmasto-olosuhteissa, joissa tulokset pääosin esitetään.

Tässä artikkelissa on esitetty kosteusteknisesti toimivia diffuusioavoimia rakenneratkaisuja purutuotteilla eristettyihin seinä-, yläpohja- ja alapohja rakennetyyppeihin silloin, kun purutuotteet ovat homeutumisherkkyyssluokassa 1.

Höyrysulkumuovi toimi hyvin kosteusteknisesti purutuotteilla kaikissa rakennetyypeissä, vaikka purutuotteiden korkean kosteuskapasiteetin vuoksi paksuimmilla eristekerroksilla sisäpinnan materiaalin vesihöyrynvastuksen merkitys väheni. Laskentatarkasteluissa saatiin hyviä tuloksia myös diffuusioavoimilla ratkaisuilla. Hyvin toimivaksi ratkaisuksi useilla rakenneyhdistelmällä osoittautui X5-ilmasulkupaperin ja vanerin yhdistelmä.

Mineraalivillatuulensuoja on tässä artikkelissa esitettyjen laskentatarkastelujen mukaan erinomainen valinta purutuotteilla eristettyjen rakenteiden tuulensuojaksi kaikissa rakennetyypeissä. Sopivuus purutuotteiden tuulensuojaksi johtuu mineraalivillan pienestä lämmönjohtavuudesta ja pienestä diffuusiovastuskertoimesta. Puukuitutuulensuojalevyn valintaan purutuotteiden tuulensuojaksi puolestaan liittyy enemmän epävarmuuksia. Puukuitutuulensuojalevyn mineraalivillaa suurempi diffuusiovastus estää varsinkin paksujen purueristevaippakerrosten kuivumisen. Vinoissa yläpohjarakenteissa puukuitutuulensuojalevyn paksuuden kasvattaminen ei ratkaisevasti parantanut rakenteen kosteusteknistä toimivuutta, ainoastaan vähensi rakenteen vikasietoisuutta ja kuivumispotentiaalia.

Mikäli puukuitulevy oli asennettu lämmöneristeeksi tuuletustilallisen harjakattoisen yläpohjarakenteen yläosaan, oli puukuitulevyn kosteuskapasiteetista näkyvää hyötyä ja homeindeksit olivat pienempiä kuin vastaavan mineraalivillalämmöneristeellä eristetyn rakenteen.

Homehtumisherkkyyssuokalla oli suuri merkitys rakenteiden homeindeksien maksimiarvoihin. Kun materiaalit kuuluivat suurempiin homehtumisherkkyyssuokkiin, homeindeksien maksimiarvot olivat lähellä nollaa.

Epävarmuutta tutkimuksen laskentatarkasteluihin tuo purutuotteiden materiaalimallien epätarkkuus, sillä purutuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet ovat hyvin riippuvaisia tiheydestä ja kosteusolosuhteista. Laskentatarkastelujen tulokset eivät näin ollen ole tarkasti verrattavissa yksittäiseen koerakenteeseen. Työhön on kuitenkin valittu koko materiaalityhmää mahdollisimman kattavasti edustavat tuotteet. Laskentatarkasteluiden tuloksista voi kuitenkin tutkia rakennusfysiikan ilmiöitä vahvasti hygrokoopipisten materiaalien osalta ja ne antavat vertailupohjaa todellisuuden kohteille.

Lähdeluettelo

- [1] Ehtatalot Oy, 2020. Ehtatalot.fi. Saatavilla: <https://www.ehtatalot.fi/> [Haettu 15.11.2020].
- [2] Forss, A. 2020. Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Tampere. Tampereen yliopisto.
- [3] Hänninen, J., Rissanen, R. & Viljanen, M., 1997. Sahateollisuuden purutuotteet rakennusten eristemateriaalina, Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- [4] Jokela, T. 2018. Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysikaalinen toiminta. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- [5] Jokela, T., Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2019. Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. Rakennusfysiikka 2019. Tampere.
- [6] Kaurinvaaha, E., Sutela, R., Yrjölä, R. & Viljanen, M., 2001. Kosteusteknisesti turvallinen sahanpurueristeinen pientalo, Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio.
- [7] Kurnitski, Jarek. Pasanen, Pertti. Miimu, Matilainen. Hyttinen, Marko. Asikainen, Vesa. 1999. Ryömintätilan Kosteus Ja Mikrobit, Raportti B62, Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- [8] Laukkarinen, A., 2014. Lämpimän ryömintätilaisen alapohjan lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelu, Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos.
- [9] Piironen, J., 2009. Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- [10] Tampereen yliopisto, 2020a. Rakennusfysiikka/kosteusanalysointimenetelmä Saatavilla: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kosteusanalysointimenetelmä/> [Haettu 22.8.2020].
- [11] Tampereen yliopisto, 2018. Rakennusfysiikka/Frame. Saatavilla: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/frame/> [Haettu 22.8.2020]
- [12] Vinha, J., 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- [13] Vinha, J; Valovirta, I; Korpi, M; Mikkilä, A; Käkelä, P., 2005. Rakennusmateriaalien ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona., Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Kutterinlastueristeisten rakenteiden hiililaskennan tuloksia

Arto Saari¹, Eero Tuominen² ja Juha Vinha²

¹ Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakentamistalous

² Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tutkimuksessa analysoidaan asuinrakentamiseen soveltuvia puupohjaisia rakennuksen ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden hiilijalan- ja kädenjälkeä. Analysoiduissa rakenteissa on lämmöneristeenä kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu. Niitä verrataan nykyään käytettäviin tyypillisiin rakenteisiin sekä esitetään myös kosteusturvalliset suositellut rakenteet. Hiililaskenta on suoritettu käyttäen ympäristöministeriön laskentamenettelyä, joka pohjautuu EN-standardeihin. Laskennassa käytettiin ympäristöministeriön julkaisemaa rakentamisen päästötietokantaa täydennettynä erikseen selvitettävillä rakennusmateriaalien päästötiedoilla. Kutterinlastulla ja savetettu kutterinlastulla lämmöneristettyjen puupohjaisten ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden hiilijalanjälki on selvästi alhaisempi kuin mineraalivillaeristeisten rakenteiden ja se on murto-osa, kun verrataan betonirakenteeseen ulkoseinään.

1. Johdanto

Luonnonmukaiset rakennusaineet ovat jo pidempään olleet yleisen kiinnostuksen kohteena, ja itse asiassa ne ovat olleetkin aiemmin vallitseva tapa rakentamisessa. Sotien jälkeen kehitettiin puurakenteinen tyypitalo, ns. rintamamiestalo, jossa lämmöneristeenä käytettiin yleisesti paikallista luonnonmukaista materiaalia sahanpurua ja kutterinlastua. Viime aikoina on Keski-Euroopasta saatu kokemuksia savetetun kutterinlastun käytöstä rakenteiden lämmöneristeenä. Näiden kokemusten innoittamana on Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän toimesta kehitetty ja testattu laboratorio- ja kenttäkokeissa ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteita, jossa on käytetty lämmöneristeenä kutterinlastua ja savetettua kutterinlastua. Tutkimukset on tehty osana Ympäristöministeriön rahoittamaa ECOSAFE -hanketta. Tulokset ovat lupaavia.

Tässä paperissa analysoidaan rakenteita, joissa on lämmöneristeenä kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu sekä lasketaan niiden hiilijalan- ja kädenjäljet. Niitä verrataan nykyään käytettäviin tyypillisiin rakenteisiin. Tässä käydään läpi edellä mainittuja hiililaskennan tuloksia.

2. Tutkimusmenetelmä

Hiililaskenta on suoritettu käyttäen ympäristöministeriön laskentamenettelyä [1], joka pohjautuu EN-standardeihin. Rakennuksen elinkaaren vaiheet ovat tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu (Kuva 1).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan tuotevaihetta, joka sisältää raaka-aineiden hankinnan (A1), kuljetuksen valmistukseen (A2) ja tuotteen valmistuksen (A3). Lisäksi laskennassa tarkastellaan rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävistä hyödyistä ja haitoista rakenteisiin varastoitunutta hiiltä (D3).

Laskennassa käytetään ympäristöministeriön julkaisemaa rakentamisen päästötietokantaa [2] täydennettynä erikseen selvitettävillä rakennusmateriaalien päästötiedoilla. Eriksien selvitettävät materiaali olivat tässä kutterinlastu ja savi.

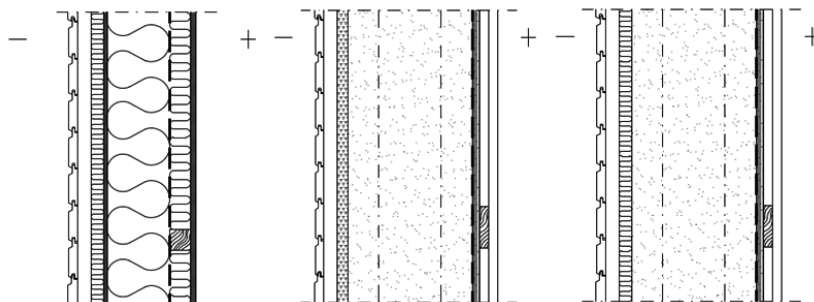
Tässä tutkimuksessa ei tarkastella rakentamisen hiilijälkeä (kuljetus työmaalle A4 ja työmaatoiminnot A5), käyttövaiheen hiilijälkeä (B) eikä elinkaaren loppua (C). Oletetaan, että tarkasteltavat rakenteet eivät aiheuta merkittävää eroa rakentamisen hiilijälkeen eikä elinkaaren lopun hiilijälkeen. Samoin vaihtoehtoisten rakenteiden U-arvot ovat samat. Siten rakenteiden välillä ei ole eroja energiankulutuksessa ja sen hiilijäljessä edellyttäen, että rakennuksen lämmitystapa on sama. Lisäksi rakenteet vaativat 50 vuoden tarkastelujakson aikana vain vähäisiä lähinnä ulkopintaan kohdistuvia korjaustoimenpiteitä. Niiden vaikutus rakennuksen hiilijälkeen on marginaalinen, eikä niitä ole huomioitu tässä tutkimuksessa.

Tuotevaihe	Rakentaminen	Käyttövaihe		Elinkaaren loppu
A1 Raaka-aineen hankinta	A4 Kuljetus työmaalle	B1 Tuotteen käyttö rakennuksessa	B5 Laajamittaiset korjaukset	C1 Purkaminen
A2 Kuljetus valmistukseen	A5 Työmaatoiminnot	B2 Kunnossapito	B6 Energian käyttö	C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn
A3 Tuotteen valmistus		B3 Korjaukset	B7 Veden käyttö	C3 Purkujätteen käsittely
		B4 Osien vaihto		C4 Purkujätteen loppusijoitus
		D		
		Lisätiedot		
		Rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävät hyödyt ja haitat		

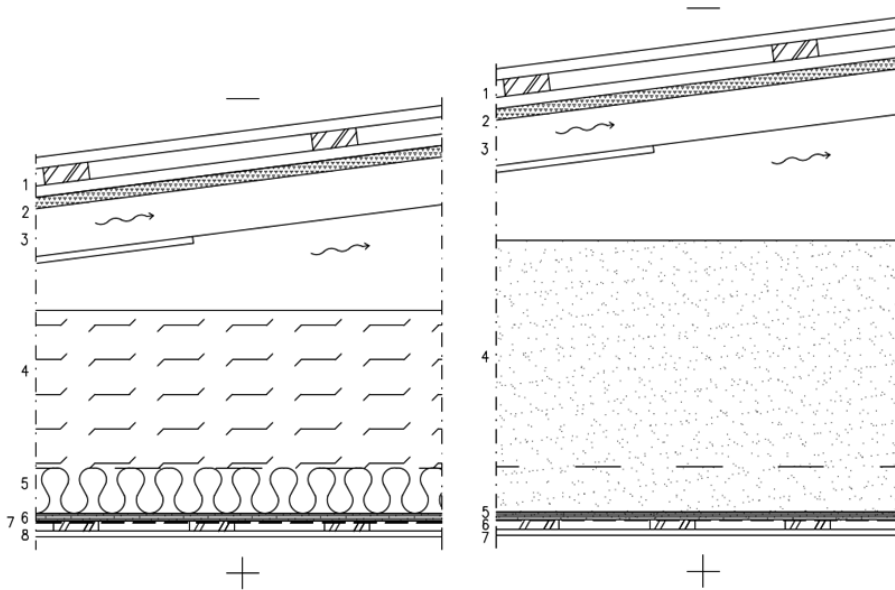
Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet rakennuksen vähähiilisyyden arvioinnissa. Muokattu käyttäen lähdettä [1].

3. Tutkitut rakenteet

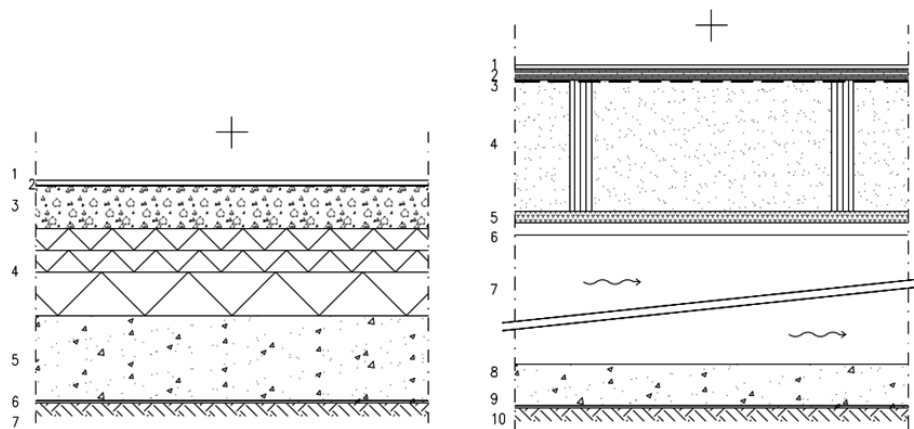
Tutkitut rakenteet on esitetty kuvissa 2-5.



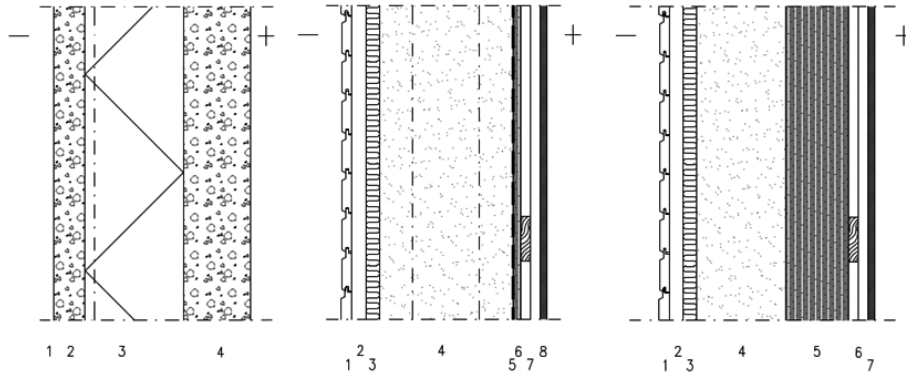
Kuva 2. Hiililaskennan kohteena olleet omakotitalon ulkoseinärakenteet. Vasemmalla: nykyään vallitseva rakenne (eristeet: 32mm+148mm+48mm); Keskellä: puupohjainen rakenne, lämmöneristeenä puhdas kutterinlastu tai savetettu kutterinlastu (eristeet: 25mm+300mm); Oikealla: puupohjainen rakenne, jossa tuulensuojana mineraalivilla (eristeet: 30mm+300mm). Rakenteiden U-arvo on 0,17 W/m²K.



Kuva 3. Hiililaskennan kohteena olleet omakotitalon yläpohjarakenteet. Vasemmalla: nykyään vallitseva rakenne (eristeet: 25mm+350mm+100mm); Oikealla: puupohjainen rakenne, lämmöneristeenä puhdas kutterinlastu tai savetettu kutterinlastu (eristeet: 25mm+600mm). Rakenteiden U-arvo on 0,09 W/m²K.



Kuva 4. Hiililaskennan kohteena olleet omakotitalon alapohjarakenteet. Vasemmalla: nykyään vallitseva rakenne (eristeet: 200mm).; Oikealla: puupohjainen rakenne, lämmöneristeenä puhdas kutterinlastu tai savetettu kutterinlastu (eristeet: 300mm+25mm). Rakenteiden U-arvo on 0,17 W/m²K.



Kuva 5. Hiililaskennan kohteena olleet kerrostalon ulkoseinärakenteet. Vasemmalla: nykyään vallitseva rakenne (eristeet: 220mm); Keskellä: rankarunkoinen puupohjainen rakenne, lämmöneristeenä puhdas kutterinlastu tai savetettu kutterinlastu (eristeet: 30mm+300mm); Oikealla: CLT-rakenteinen puupohjainen rakenne (eristeet: 30mm+200mm). Rakenteiden U-arvo on 0,17 W/m²K.

4. Laskennan tulokset

Hiililaskennan tulokset on esitetty taulukossa 1. Laskennan kohteena olevat rakenteet ovat U-arvoltaan yhtenevät, eli ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m²K, yläpohjien U-arvo on 0,09 W/m²K ja alapohjien U-arvo on 0,17 W/m²K.

Laskelmissa on oletettu, että kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu käsitellään lähellä paikkaa, jossa kutterinlastua syntyy saha- tai puusepänteollisuuden sivutuotteena. Myöskin on oletettu, että käytettävä savi on läheltä saatavaa kaivuujätettä ja sitä aurinkokuivataan. Samoin on oletettu, että kutterinlastun ja savetetun kutterinlastun mahdollisessa lisäkuivatuksessa käytetään polttoaineena purua ja jätettä.

Laskennassa ei ole laskettu 50 vuoden tarkastelujakson jälkeistä materiaalien uudelleen käyttöä ja kierrätystä (D1) eikä energiakäyttöä (D2). Voidaan kuitenkin olettaa, että puupohjainen materiaali käytetään pääosin energiakäytössä sekä betoni ja teräs kierrätetään.

Betonirakenteet sitovat käytön aikana hiiltä karbonatisoitumisen seurauksena. Käytössä olevassa rakennuskannassa betonin karbonatisoitumisen aikaansaama hiilensidontapotentiaali on arviolta noin 15-20 % kalsinoinnin päästöistä (CANEMURE-hankkeen CO₂crete solution-osahankkeen raportti Q1/2020, viitattu lähteessä [2]). Saman lähteen mukaan rakennuksen purkamisen jälkeen pieneen raekokoon murskattuna sen karbonatisoitumisen potentiaali on n. 80 % kalsinoinnin päästöistä. Se kuitenkin edellyttää murskeen kääntelyä muutaman kuukauden ajan siten, että aktiivista pintaa saadaan murskekasassa esiin.

Taulukoissa 2-3 on esitetty kerrostalon ulkoseinärakenteiden hiililaskennan tuoterakennelaskelmia.

Taulukko 1. Laskennan tulokset.

Rakenne		Määrä	Yksikkö	Hiilijalanjälki A1-A3, kgCO2e			Hiilikädenjälki, kgCO2e
Koodi	Nimi			GWP (A1-A3), Tyypillinen arvo, kgCO2e	Konservatiivisen arvon kerroin	GWP (A1-A3), Konservatiivinen arvo, kgCO2e	D3 Hiilivarasto
Omakotitalo:							
US-mv, U=0,17	Omakotitalo nykyisin ratkaisuin	1	us-m2	44	1,2	53	-33
US-kl	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, puhdas kutteri	1	us-m2	14	1,2	17	-143
US-kl_s	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, savetettu kutteri	1	us-m2	15	1,2	18	-142
US-kl-mv	Omakotitalo ECOSAFE-suositusratkaisu, puhdas kutteri	1	us-m2	35	1,2	42	-142
US-kl_s-mv	Omakotitalo ECOSAFE-suositusratkaisu, savetettu kutteri	1	us-m2	35	1,2	42	-142
YP-mv U=0,09	Omakotitalo nykyisin ratkaisuin	1	yp-m2	36	1,2	43	-39
YP-kl	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, puhdas kutteri	1	yp-m2	12	1,2	15	-207
YP-kl_s	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, savetettu kutteri	1	yp-m2	12	1,2	15	-207
YP-kl	Omakotitalo ECOSAFE-suositusratkaisu, puhdas kutteri	1	yp-m2	12	1,2	15	-207
YP-kl_s	Omakotitalo ECOSAFE-suositusratkaisu, savetettu kutteri	1	yp-m2	12	1,2	15	-207
AP-maa, U=0,17	Omakotitalo nykyisin ratkaisuin	1	ap-m2	50	1,2	60	0
AP-kl	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, puhdas kutteri	1	ap-m2	19	1,2	23	-135
AP-kl_s	Omakotitalo puupohjaisin ratkaisuin, savetettu kutteri	1	ap-m2	19	1,2	23	-135
AP-maa, U=0,17	Omakotitalo, ECOSAFE-suositusratkaisu	1	ap-m2	50	1,2	60	0
Kerrostalo:							
US-bet, U=0,17, ei kanta	Kerrostalo tyypillinen nykyinen rakenne, ei kantava	1	us-m2	77	1,2	92	0
US-bet U=0,17, kantava	Kerrostalo tyypillinen nykyinen rakenne, kantava	1	us-m2	96	1,2	115	0
US-kl_s-ranka	Kerrostalo puupohjainen seinärakenne	1	us-m2	16	1,2	19	-142
US-kl_s-clt	CLT kerrostalo, kutterieristetty seinärakenne	1	us-m2	18	1,2	22	-199

Koodin kerkinnot: US = ulkoseinä, YP = yläpohja, AP = alapohja, kl = kutterinlastu, kl_s = savetettu kutterinlastu, mv = mineraalivilla, bet = betoni, ranka = rankarunko, clt = ristiinlaminoitu puu, maa = maanvastainen

Taulukko 2. Kerrostalon betonirakenteisen ulkoseinän tuotevaiheen (A1-A3) hiililaskelma.

Rakennusosa		Rakennusosan hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki							Tuotetieto	
Rivi		Rivit	Määrä	Yksikkö	GWP (A1-A3), Tyypillinen arvo, kgCO2e	Konservatiivisen arvon kerroin	GWP (A1-A3), Konservatiivinen arvo, kgCO2e	D3 Hiilivarasto	Lähde	Pvm
1	Pintarakenne									
2	80 mm Betoniulkokuori	2,3,4	1	us-m2	77	1,2	92	0	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
3	220 mm Uritettu mineraalivilla									
4	80 mm Betonisisäkuori, ei kantava									
5	Pintarakenne									
YHTEENSÄ			1	us-m2	77	1,2	92	0		

Arto Saari 11.10.2021

Taulukko 3. Kerrostalon puurakenteisen CLT-ulkoseinän tuotevaiheen (A1-A3) hiililaskelma.

CLT kerrostalo, kutterieristetty seinärakenne										
US-ki s-clt										
Rvi	Rakennusosa	Rvit	Määrä	Yksikkö	GWP (A1-A3), Tyypillinen arvo, kgCO2e	Konservatiivisen arvon kerroin	GWP (A1-A3), Konservatiivinen arvo, kgCO2e	D3 Hiilivarasto	Tuotetieto	Pvm
1	Pintarakenne									
2	>23 mm Ulkoverhouslauda	2	1	us-m2	0,7	1,2	0,9	-16,7	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
3	32 mm Ilmarako + pystyauoitus 32x100 k600, tarvittavat palokatkot	3	1	us-m2	0,2	1,2	0,2	-4,1	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
4	30 mm Mneraalivillatuulensuoja, paroc cortex, lambda_d=0,033	3	1	us-m2	2,2	1,2	2,6	0,0	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
5	200 mm 200 mm savetettu kutterinlastueriste + pystyrunko 50x200									
	* Savi	5	1	us-m2	0,0	1,2	0,0	0,0	Pölkky Oy	23.4.2021
	* Kutterinlastu	5	1	us-m2	0,0	1,2	0,0	-54,4	Pölkky Oy	23.4.2021
	* Pystyrunko kerto 50x200	5	1	us-m2	0,5	1,2	0,6	-12,7	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
6	140 mm 140 mm CLT-massiivipuulaatta	6	1	us-m2	11,2	1,2	13,4	-105,3	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
8	44 mm Ristiinkoolaus / asennustila 2x 22x100 k600	8	1	us-m2	0,2	1,2	0,3	-5,6	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
9	15 mm Palokipsilevy	9	1	us-m2	3,0	1,2	3,6	0,0	Rakentamisen päästötieto	18.3.2021
10	Pintarakenne									
YHTEENSÄ			1	us-m2	18	1,2	22	-199		

Arto Saari 11.10.2021

5. Yhteenveto

Kutterinlastulla ja savetettu kutterinlastulla lämmöneristettyjen puupohjaisten ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden hiilijalanjälki on selvästi alhaisempi kuin mineraalivillaeristeisten rakenteiden ja se on murto-osa, kun verrataan betonirakenteiseen ulkoseinään. Kutterinlastua saadaan saha- ja puusepänteollisuuden sivutuotteena. Samoin sieltä saadaan jätettä, jota voidaan tarvittaessa käyttää kutterinlastun ja saven kuivaukseen. Kutterinlastun ja saven käyttö tukee paikallista teollisuutta ja työllisyyttä.

Lähdeluettelo

- [1] Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä, Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22, 54 s. Julkaisun pysyvä osoite: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>
- [2] Rakentamisen päästötietokanta, Suomen ympäristökeskus SYKE, Ympäristöministeriö, <https://co2data.fi/>
- [3] Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, Osa 2, Rakennusteollisuus, 15.5.2020 Gaia Consulting Oy, Helsinki, 83 s.

Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja sisäilmaemissioiden on-line havaintoja

Mirja Salkinoja-Salonen^{1,3}, Salla Venäläinen², Timo Hokkanen, Vesa T. Korhonen³, Arto Visala³, Panu Harmo³ ja Juha Vinha⁴

¹ Helsingin yliopisto, kemian laitos

² Helsingin yliopisto, maaperä- ja ympäristötieteen yksikkö

³ Aalto-yliopisto, sähkötekniikan ja automaation laitos

⁴ Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Ecosafe on ympäristöministeriön, yritysten ja yliopistojen yhteishanke ja tutkii kotimaista savetettua kutteria eristeenä ja savea esimerkiksi seinärappauksena 2100-luvun olosuhteisiin soveltuvassa rakentamisessa. Tavoitteena on kehittää teollistettavia tuotteita, jotka ovat hiiliviisaita ja kosteusturvallisia sekä täyttävät lämpö- ja äänieristyksen, paloturvallisuuden ja uutena mittarina mikrobiturvallisuuden vaatimukset.

Lämpöeristeisiin kohdistuu sisä- ja ulkoilman lämpötila- ja kosteusolosuhteiden vaihtelusta johtuvaa rasitusta. Eristeisiin voi muodostua ns. *aox*-homeita, jotka emittoivat sisäilmaan ihmiselle haitallisia *tVOC*-päästöjä, jotka liikkuvat kaasuna tai vesihöyryn mukana ilmateitse esim. keuhkoihin. *Aox*-homeet sietävät homeiden kasvua rajoittavia biosideja kuten booria. Lisäksi materiaalien rikki voi pelkistyä bakteerien toimesta terveydelle haitalliseksi rikkivedyksi [4].

Savetus alensi eristeen suhteellista kosteutta (RH) jopa 6 prosenttiyksikköä. Kutterinlastun päästöjä tutkittiin sekä savilisäyksellä että ilman, suljetuissa kammiossa 10 - 30 d ajan. Kammioon kytkettyjen antureiden avulla materiaalien hiilidioksidi- ja *tVOC*-emissioita tarkasteltiin kosteutta varioiden jatkuvatoimisesti.

Mittauksissa havaittiin, että kutterinlastun savettaminen lievästi emäksisillä rautapitoisilla savilla, joiden kalium/natrium-suhde oli korkea, vaimensi kutterinlastun *tVOC*-emissioita muuntaen ne terveydelle haitattomaksi hiilidioksidiksi.

1. Johdanto

Rakennusala on vuosikymmeniä tuottanut uusia materiaaleja, joiden sopivuus ihmisen biologiaan on selvinnyt viiveellä. Usein on ihastuttu tiettyyn fysikaaliseen ominaisuuteen, havaiten myöhemmin aineen haitallisuus ihmisen biologiaan ja terveyteen pitkäaikaiskäytössä tai huono vikasietoisuus esimerkiksi kosteuskapasiteetin osalta. Esimerkiksi asbesti, kreosootti, lastulevyn formaldehydit, liimat ja muut lisäaineet toimivat hyvin jonkin fysikaalinen omaisuuden osalta ja ovat rakennustekniikalle ja -taloudelle edullisia. Niitä on myös voitu tuottaa edullisesti teollisuuden sivutuotteena tai erillisessä prosessissa. Niiden haitat ihmisen biologialle ymmärretään nyt paremmin.

Empirian todistusarvo on ohjannut vain vähän teollisuuden materiaalivalinnoissa tai puuttunut, samoin kuin pitkäaikainen kenttätutkimus ja tarkka biologinen/terveysvaikutusten arviointi. Elintarviketuotannosta tuttu materiaalikoostumuksen julkaisupakon puuttuminen rakennusmateriaalituotannosta on myös pitänyt kuluttajat pimennossa rakennustuotteissa

käytetyistä lisäaineista. Tämä on tilanne edelleen; emme tiedä mitä lisäaineita käytetään esimerkiksi betonissa, teollisissa eristeissä ja kipsilevyissä, emmekä kattavasti niiden suoria tai epäsuoria terveysvaikutuksia.

Ecosafe lähtee olettamuksesta, että minimoimalla tuotteissa olevat lisäaineet, minimoidaan myös niihin liittyviä terveysriskejä. Muita tavoitteita ovat elinkaaren matala hiilijalanjälki, materiaalien kierrätettävyyden, kosteusturvallisuus ja kotimaisuus. Näin on päädytty puu- ja savipohjaiseen kutteriin ja saveen, joita molempia löytyy Suomen luonnosta runsaasti ja joihin voidaan olettaa ihmisen evoluutiossaan sopeutuneen myös biologisesti.

Onkin siis arvioitava valittujen aineiden soveltuvuus rakentamiseen nykytieteen mittareilla.

Empirian todiste puulla, kutterilla ja savilla jo on; monet yli 100-vuotiaat niistä tehdyt talot ovat edelleen terveitä asua, koettuaan vaihtelevia vuosikymmeniä käytön ja olosuhteiden osalta.

Vikasietoisuus on rakennusmateriaalille vahvuus ja Ecosafe laajentaa tätä käsitettä mikrobien maailmaan. Voidaanko siis puusta ja savesta rakentaa kosteus- ja terveysturvallisesti nykymääräysten mukaisia rakenteita ja rakennuksia esimerkiksi eristepaksuuksia lisäämällä?

2. Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja niiden sisäilmapäästöjen online-havainnointi

Savet ovat hienojakoisia kivennäismaalajeja, joiden fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset ominaisuudet vaihtelevat. Ecosafe-hankkeessa selvitetään, miten puupohjaisten eristemateriaalien savetus eli pinnoittaminen savella vaikuttaa niiden mikrobitoimintaan ja mikrobien tuottamien haitallisten aineiden emissioihin. Aihetta ei ole aiemmin tutkittu.

Mikrobit dominoivat elämää maapallolla. Niitä on aina ja kaikkialla ja niiden massa on yhtä suuri kuin kasvien ja eläinten yhteensä. Materiaalit ja olosuhteet määrittävät millaisia mikrobeja rakennukseen muodostuu. Yleisesti voidaan sanoa, että ihminen tarvitsee monipuolisia runsaita mikrobeja (esimerkiksi suoliston bakteerikanta), mutta osa mikrobeista voi tuottaa ihmiselle haitallisia *VOC*-päästöjä, jotka hengitysteihin päästyään voivat vaurioittaa ihmisen immuunipuolustusta ja neurologiaa [3]. Siksi niiden tutkiminen osana rakennusbiologiaa on tärkeää.

Ecosafe yhdistää rakennusfysiikan ja mikrobiologian terveellisen rakentamisen edistämiseksi.

2.1 Savien ja kutterinlastun fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien karakterisointi

Ominaisuuksiltaan erityyppisten savien voidaan olettaa vaikuttavan eri tavoin esim. savetetun purueristeen ominaisuuksiin. Savetetun purueristeen ominaisuuksiin vaikuttavat mm. saveksen ($\Theta < 0,002$ mm hiukkaset) osuus saviaineksesta, saven kemiallinen koostumus sekä saven negatiivinen sähkövaraus ja erittäin suuri ominaispinta-ala (jopa $500 \text{ m}^2 / 1\text{g}$ savea, ulko- ja sisäpinnat yhteensä), jotka indikoivat ravinteille ja niitä hyödyntäville mikrobeille tarjolla olevien hiukkaspintojen määrää.

Tutkittavien savien ja kutterinlastujen kemialliset koostumukset ja ravinnepitoisuudet määritettiin mikroaaltoavusteisella märkäpoltomenetelmällä [1]. Alkuaineiden (Ca, Mg, K, Na, P, S) pitoisuudet mitattiin liuosfaasista ICP-OES:lla. Savien negatiivista nettovarausta kuvaava kationinvaihtokapasiteetti (KVK) määritettiin uuttamalla näytteitä 1 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ -liuoksella (pH 7) ja mittaamalla liuosfaasista K-, Na-, Ca- ja Mg-pitoisuudet ICP-OES:lla. Vaihtuva

happamuus määritettiin titraamalla uutteen 0,02 M NaOH:lla. Savien ominaispinta-ala määritettiin vesihöyryn adsorption ja ns. BET-yhtälön avulla [2].

Ecosafe hakee toimivia mittareita mikrobitoiminnaltaan hyvien savien valintaan sekä rakennusfysiikan osalta hyödyntää savien muita ominaisuuksia, mm. kosteus- paloturvallisuutta.

2.1.1 Materiaaleista mitattuja ominaisuuksia

Taulukossa 1a on esitetty tutkittujen kutterinlastujen ja savien alkuainepitoisuudet (mg/kg).

Taulukko 1a. Kutterinlastuista (Puu 201 ja 205), savetetusta kutterista (202: 201 savettuna) ja savimateriaaleista (Savet 101, 102, 103 ja 104) määritettyjen alkuaineiden pitoisuudet (mg/kg)

	K	Na	K/Na	Ca	Mg	S	P	B	Fe	Al	Mn	Zn
Puu 201	590	121	4,9	466	187	89	61	8	4	7	97	27
Puu 202	2055	176	11,7	1711	3662	105	226	63	13790	9675	227	53
Puu 205	395	28	13,9	701	152	93	21	7	3	0	11	17
Savi 101	6798	541	12,6	5032	12050	179	565	164	50956	34311	545	127
Savi 102	9005	646	13,9	5122	13956	131	627	159	48157	34964	514	120
Savi 103	6768	929	7,3	3076	9744	550	627	123	35063	24878	352	98
Savi 104	11057	1183	9,3	6440	14797	675	635	189	55173	42907	445	133

Taulukossa 1b on esitetty savien ja kutterilastun fysikaalisia ominaisuuksia.

Taulukko 1b. Tutkittavien savien (Savet 101, 102, 103 ja 104) ja kutterilastun (Puu 205) fysikaalisia ominaisuuksia

Tutkittu näyte	pH	Sähkönjohtokyky EC mS/cm	KVK cmol(+)/kg	Ominaispinta-ala m²/g
Puu 205	4			
Savi 101	7,1	0,07	27,2	86
Savi 102	7,5	0,06	20,7	59
Savi 103	6,6	1,50	10,5	34
Savi 104	7,6	0,87	26,9	78

Savet 101 ja 102 ovat teollisesti Suomesta saatavia, vähärikkisiä tuotteita. Savien karakterisointi on melko nopea ja edullinen tutkimus, millä voi olla suuri käytännön merkitys rakentamispäätösten kannalta.

Kammiomittauksissa matalan rikki- ja korkean kalium/natrium-suhteen saville saatiin hyviä tuloksia *tVOC*-päästöjen vähentämisessä. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että materiaalissa esiintyneen *aox*-tyyppisen homeen haitalliset *tVOC*-päästöt loppuivat, kun siihen lisättiin kyseisenlaista savea. Tällä voi olla suuri merkitys rakennuksen terveellisyyden kannalta, sillä *tVOC*-päästöille on STM:nkin määrittelemä yläraja (400 ppb).

2.2 Materiaalien kammiomittaukset ja mikrobiologia

Aalto yliopistolla on kehitetty on-line anturitekniikka ihmiselle mahdollisesti haitallisia päästöjä aiheuttavien materiaalien tunnistamiseksi. Mikrobin sisäilmaan tuottamia kaasua ja aerosolisolipäästöjä tutkittiin kammioon kytketyillä *tVOC*- ja *CO₂-on-line* antureilla; 1 havainto/min, 1440 havaintoa/vrk. Jatkuvat toimiset anturit tuottavat tietoa tutkimuskammioiden suhteellisesta kosteudesta (RH%), hiilidioksidipitoisuudesta (*CO₂*), lämpötilasta, kammioilman happipitoisuudesta (*O₂* vol%), *tVOC*-pitoisuudesta (ppb) ja rikkipitoisten kaasujen (*H₂S*, ppm) pitoisuudesta.

Näillä laitteilla löydetään kaiken kokoiset orgaaniset aineenvaihduntatuotteet (*tVOC*), myös suuret yli 400 g/mol, toisin kuin esimerkiksi virallinen STM:n menetelmä, joka rajaa mittaukset alle 220 g/mol kokosiin molekyyliin. Kuitenkin ihmiselle haitallisista sisäilma *tVOC*-päästöistä pääosa on molekyylikooltaan yli 400 g/mol.

Ecosafen tavoite on kutteripurujen savetuksen ja savirappauksen avulla minimoida materiaaliaperäiset haittapäästöt käyttämällä oikeanlaisia savilaatuja. Tällaiset savet voivat soveltaa käytettäväksi kosteuskapasiteetiltaan hyvissä materiaaleissa, jotka ovat yhteensopivia ihmisen biologian kanssa, tavoitteena sisäilman laadun parantaminen.

2.2.1 *Aox*-tyypin homeista

tVOC-päästöjen tuottajamikrobin *aox*-ominaisuus (alternatiivinen oksidaasi), on tyypillinen mm. ihmisiä ja viljelykasveja sairastuttaville homeille. Nämä mikrobit ovat immuuneja homeenestokemikaaleille (biosidit, mm. boori) ja voivat näin saada kilpailuedun muilta, ihmiselle vähemmän haitallisilta mikrobeilta tietyissä rakennusmateriaaleissa ja tietyissä olosuhteissa.

Aox-mikrobin aineenvaihduntatuotteet (*tVOC*) voi olla ihmiselle haitallisia sisäilmassa, mistä on aiemmissa tutkimuksissa löydetty jo viitteitä [5,6,7]. Näille päästöille on tyypillistä suuri molekyyliainepaino, rasvaliukoisuus ja korkea höyrystymislämpö, minkä takia niiden ei ole ajateltu kaasuuntuvan huonelämmöissä eikä siten joutuvan keuhkoihimme. Kuitenkin ne voivat kulkeutua sisäilmaan ja hengitysteihin vesihöyryn mukana [8], kuten Covid-19 virusten yhteydessä on dramaattisesti opittu. Vesihöyry on siis tehokas kuljetin, myös haihtumattomille aineille. Hengitysteissä ei ole suoja- tai turvamekanismeja epäpuhtauksille toisin kuin ruuansulatuskanavassa, joten pienetkin pitoisuudet aiheuttavat haittoja.

Rikkivetyä syntyy mm. viemäreistä ja tietyissä materiaaleissa oleva rikki (*CaSO₄*/kipsi, jossa on n. 20% rikkiä ja ammonium-sulfaatti/palonsuoja-aine) voi mikrobin toimesta muuntua rikkivedyksi. Rikkivety on itsessään todettu ihmiselle haitalliseksi aineeksi (mm. yhteys Alzheimer ja Parkinsonin tauteihin [3]). Muista monista materiaalien lisäaineista ei yleensä saada tietoa.

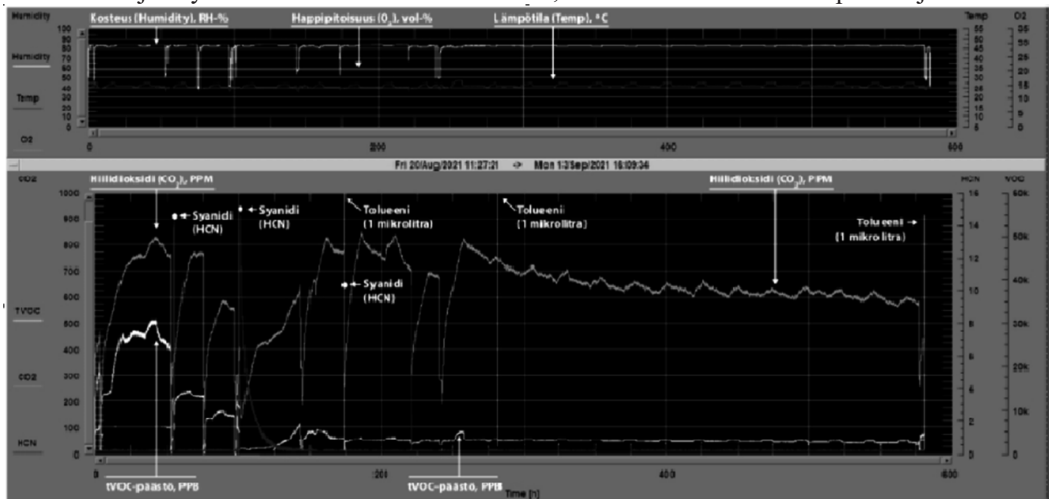
Aox-homeille elintilakilpailua muita mikrobeja vastaan edesauttavat biosidien käyttö rakennusmateriaaleissa (boori-yhdisteet, kationiset tensidit) ja rikkivety, erityisen kuivat ja kylmät olosuhteet sekä happipula ja korkea *CO₂*-pitoisuus materiaalissa. Jos *aox*-homeille etua antavia tekijöitä ei ole, ne kasvavat muita homeita hitaammin eivätkä valtaa materiaalia; esimerkiksi luonnonmateriaaleissa, joissa ei ole biosideja tai muita kemiallisia lisäaineita.

2.2.2 Materiaaleista mitattuja tuloksia (2021/syyskuu -tilanne)

Kammionmittaukset toteutettiin kuvan 1 mukaisesti Aalto yliopistossa kehitetyllä anturimittauslaitteistolla, kammion koon ollessa 1 ltr ja näytemäärä noin 10-40grammaa.

Kuva 1 esittää sisäilmapäästöjä savetetusta puusta, jossa *tVOC* ei ollut *aox*-tyypin homeiden tuottamaa, sillä syanidilisäys pysäytti *tVOC*-päästöt (alakuva, alin käyrä). *Aox*-tyypin homeet tunnistaa siitä, että ne sietävät syanidia. Syanidilisäys siis tehtiin *aox*-homeiden tunnistamiseksi.

1 litran kammiossa 10g kutteria (puu 205) ja 30g savea (savi 104) kostutettiin tislatulla vedellä (6ml). Käyrissä näkyvät pudotukset osoittavat kammioiden tuuletusten (30 min/kerta) vaikutuksen ja käyrän nousu uudelleen osoittaa sen, että mikrobin tuottamat päästöt jatkuivat.



Kuva 1. Kuukauden ajan mitattu kerran minuutissa savetetusta kutterista, yli 40 000 mittausta. Yläkuva: RH%, happipitoisuus ja lämpötila. Alempi kuva *tVOC*-päästöt(ppb), CO_2 (ppm) altistaen materiaali syanidille (1mg) ja rikkivedylle mikrobin *aox*-ominaisuuden tunnistamiseksi. *tVOC* on kalibroitu toluenilla (1 mikro-ltr).

Kammionmittauksilla havaittiin, että emäkiset, rautapitoiset savet, joissa kalium/natrium-suhde on korkea, sopivat *tVOC* päästöisten sisätilamateriaalien *aox*-homeiden vaimentajiksi. Tietty savilajit ylläpitävät alternatiivisten *aox* -tyyppisten homeiden tuottamien *tVOC* yhdisteiden biohajoamista hiilidioksidiksi (CO_2). Tästä on hyötyä ihmisen biologialle turvallisten ja vikasietoisten materiaalien valmistuksessa.

Johtopäätöksenä tässä vaiheessa on, että savettamalla materiaaleja ja välttämällä biosidisia kemikaaleja, voidaan parantaa materiaaliemissioiden pysymistä ihmiselle haitattomina myös kosteuden noustessa esimerkiksi rakenneaurioiden yhteydessä tai syksyllä sekä talvikautena, jolloin sisäilman ja eristeen kosteus ja lämpötila voivat myös pudota erittäin alas. Yhdistettynä saven kosteusteknisiin ominaisuuksiin mikrobiologian tulokset tukevat saven käyttöä rakentamisessa eristeiden yhteydessä.

Ecosafe-hankkeen muut tutkimukset tuovat lisätietoa mm. savirapatun seinän toimivuudesta kosteuden tasaajana, palonsuojana ja äänieristeenä.

2.3 Mikrobitutkimuksen jatko Ecosafe -hankkeessa

Kammioiden ilmasta kerättyjä näytteitä analysoidaan myös kemiallisesti ja mahdollisesti toksikologisesti. Savetettua kutterinlastua ja joitakin verrokkimateriaaleja tutkitaan lisäksi hallituissa olosuhteissa olosuhdekammioissa, joissa tunnistetaan niissä esiintyvät mikrobilajit tarkasti DNA-määrittelyksen avulla. Tutkimuksissa selvitetään myös mikrobilajien mahdolliset *aox*-geenit. (Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos). Materiaaleista löydettyjen *aox*-mikrobien lajinimien perusteella on mahdollista tehdä johtopäätöksiä niiden terveysvaikutuksista.

Tutkimusta ja sen tuloksia on tarkoitus esitellä erikseen kutsuttavalle asiantuntijaryhmälle.

3. Yhteenvedo

Ecosafe tutkii tieteellisesti savetetun kutterilastun sopivuutta rakennusfysiikan ja mikrobiologian kannalta eristeeksi ja saven toimivuutta seinäpinnoitteeksi. Molemmat materiaalit ovat Suomen luonnosta sellaisenaan jo löytyviä tai nykyisen teollisuuden sivutuotteina syntyviä sekä täydellisesti luonnonkiertoon sopivia ja vähähiilisiä elinkaarensa osalta. Ensimmäiset tulokset ovat lupaavia. Savetettuna kutterilastun kosteusturvallisuus paranee merkittävästi.

Tietyt savilaadut edistävät materiaaleissa esiintyvien *tVOC*-päästöjen mineralisoitumista CO₂:ksi, joka on helposti tuulettuva kaasu. Saven rautapitoisuus, emäksisyys ja korkea kalium/natrium-suhte korreloivat positiivisten vaikutusten kanssa. *tVOC*-päästöjen haitallisuutta voidaan mitata anturitekniikalla, joka löytää sekä kaasut että vesihöyryn mukana kulkeutuvat suuri molekyylliset aerosolit (ml. *aox*-homeiden *tVOC*-yhdisteet).

Erityisen kuivat, kylmät ja vähähappiset olosuhteet ja rikkivety ja biosidit kuten boori-kemikaalit edesauttavat haitallisten *tVOC*-päästöjen syntymistä antamalla niitä tuottaville, sitkeille *aox*-homeille kilpailuetua. Rikkivetyä voi syntyä myös mikrobien toimesta, mikäli materiaalissa on itsessään rikkiä, esimerkiksi kipsilevyssä.

Lopuksi: tekijät kiittävät rakennusfysiikkaa, ympäristöministeriötä ja rakennusalan toimijoita pääsemisestä mukaan hiiliviisaaseen ja terveelliseen rakentamiseen tähtäävään tutkimukseen.

Lähdeluettelo

- [1] U.S. EPA. 2007. Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils. Revision 1. Washington DC.
- [2] Brunauer, G., Emmet, B.H. & Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60: 309–319.
- [3] Pushchina EV, Marinina K.S. & Myasoyedov S.D. 2020 (katsaus). Hydrogen sulfide and pathophysiology of the CNS. Neurophysiology 52:308-321.
- [4] Harmo P. (6 muuta) Visala A. & Salkinoja-Salonen M 2017. Mikrobien tuottamat haitalliset rikkijyhdisteet sisäilmassa. uusi on-line sovellettava mittaustekniikka. SIY raportti (Sisäilmayhdistys), 2017, sivut 233-237.
- [5] Castagnoli E.(4 muuta), Salonen H. ja Kurnitski J. 2018. Indoor Trichoderma strains emitting peptaibols in guttation droplets. J. Appl. Microbiol. doi 10.1111/jam.13920
- [6] Andersson MA, (3 muuta) Kurnitski J., Salonen H., 2021. Melinacidin-producing *Agrostalagmus luteoalbus*, a major constituent of mixed mycobiota contaminating insulation material in an outdoor wall. Pathogens 2021, 10, 843. <https://doi.org/10.3390/pathogens10070843>.
- [7] Andersson M.A.(4 muuta),Kurnitski J., Salonen H. 2020. Bioreactivity, guttation and agents influencing surface tension of water emitted by actively growing indoor mould isolates. Microorganisms 2020, 8, 1940: <https://doi:10.3390/microorganisms8121940>.
- [8] Mannerström M., Toimela T., Ahoniemi J., Makiou A-S., Heinonen T. 2020. Cytotoxicity of water samples condensed from indoor air: an indicator of poor indoor air quality. Applied in vitro Toxicology, Vol. 6, No. 4. DOI: 10.1089/aivt.2020.0017

A10. Rakennuksen tiivistys ja ilmanvaihto

Syrjäytysilmanvaihdon mitoitus kevyillä ja raskailla rakenteilla

Natalia Lastovets¹, Risto Kosonen² ja Juha Jokisalo²

¹ Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, talotekniikka

² Aalto-yliopisto, konetekniikan laitos

Tiivistelmä

Syrjäytysilmanvaihdon mitoitus perustuu yleensä lämpötasapainoon perustuvaan menetelmään, jossa huonelämpötilan ylikuumeneminen on ensisijainen sisäilmaongelma. Erilaisia menetelmiä ilmavirran laskemiseksi on kehitetty useita vuosikymmeniä. Yleisesti käytetyt menetelmät perustuvat vain stationaarisin malleihin. Käytännön sovelluksissa syrjäytysilmanvaihdon toiminta riippuu dynaamisista parametreista, kuten lämpökuorman tyypistä sekä sen sijainnista ja ajallisesta vaihtelusta. Lisäksi rakenteiden terminen massa vaikuttaa huoneilman lämpötilaan. Tässä tutkimuksessa esitellään dynaamisen syrjäytysilmanvaihdon laskentamalli ja case-tarkastelu sen soveltavuudesta luentosalissa. Esimerkkiluentosalissa termisen massan vaikutusta sisälämpötilan kerrostumiseen ja ilmavirran mitoitukseen ilmavirran tutkitaan raskailla ja kevyillä rakenteilla. Kehitetystä menetelmästä dynaamisen mallin sisäilman ja rakenteiden lämpökapasiteetit kalibroidaan rakennussimulointimallin IDA-ICE tuloksien avulla. Tulokset osoittavat, että kevyet rakenteet reagoivat nopeammin lämpötilan muutoksiin kuin raskaat, ja vaaditut ilmavirtaukset kasvoivat raskaaseen rakenteeseen verrattuna.

1. Johdanto

Syrjäytysilmanvaihdon avulla viileämpi tuloilma tuodaan suoraan pienellä nopeudella oleskeluyöhykkeen alaosaan. Ilmavirrat sitten nousevat ylöspäin lämmönlähteistä ja poistetaan tilan yläosasta. Syrjäyttävässä ilmanjakotavassa poistoilman lämpötila on suurempi kuin ilmanlämpötila lattiatilassa, ja vain oleskeluyöhykkeellä ilman lämpötila pidetään halutussa.

Syrjäytysilmanvaihdon mitoitus yleensä perustuu suunnitellun oleskeluyöhykkeen lämpötilan hallintaan. Lämpötasapainoon perustuvaa menetelmää käytetään syrjäytysilmanvaihdon suunnittelemissa, kun ylikuumeneminen on ensisijainen sisäilmaongelma. Tarkan huonetilan lämpötilakerrostuman määrittäminen on tärkeä syrjäytysilmanvaihdon suunnittelussa, koska se liittyy suoraan tuloilmavirran mitoitukseen. Useita erillisiä yksinkertaistettuja malleja on kehitetty ennustamaan pystysuuntaisen lämpötilagradienttia tiloissa, joissa syrjäytysilmanvaihtoa on käytetty. Ne eroavat yöhykkeiden lukumäärästä, lämmönlähteiden sijainnista ja sekoituskorkeuden laskentaperiaatteista. Tutkimukset paljastivat, että yleisesti käytetyt lineaarisen lämpötilakerrostuman perustuvat mallit [1] eivät pysty arvioimaan tarkasti huoneilman lämpötilagradienttia [2]. Moniväyhemallit ottavat huomioon lämpökuormien tyypit ja sijainnit ja pystyvät ennustamaan tarkasti lämpötilakerrostuman tiloissa, joissa syrjäytysilmanvaihtoa on käytetty [2].

Käytännön sovelluksissa stationaaritilannetta ei kuitenkaan esiinny ja huoneiden lämpökuormat vaihtelevat merkittävästi käyttöjakson aikana. Useissa tapauksissa syrjäytysilmanvaihdon toimintaan vaikuttaa useat dynaamiset parametrit, kuten lämpökuormien tyyppi, konvektiovirtauksien sijainti ja tuloilman lämpötila. Lisäksi rakennuksen terminen massa ja tilojen käyttöprofiilit vaikuttavat merkittävästi huoneen ilmalämpötilaan. Rakennusten lämpömassaa koskevat tutkimukset keskittyvät rakennuksen energiantarpeen vähentämiseen ja rakennusmateriaalien lämpömassan tehokkuuteen. Rakennukseen sijoitetut termiset massat varaavat massaan jäähdysenergiaa, jolloin voidaan samalla vähentää jäähdystyksen tarvetta. Lisäksi yöaikaisella ilmanvaihdon avulla voidaan pyrkiä poistamaan termisen massan päivän aikana

varastoitunut lämpöenergia. Käytännössä yötuuletus voidaan toteuttaa palvelu- ja toimistorakennuksissa, jossa toimintaa on pääsääntöisesti päivä aikaan. Tässä artikkelissa esitellään syrjäytysilmanvaihdon dynaaminen mitoituksen lähestymistapa, jonka tuloksia verrataan perinteiseen menetelmään muutamassa tyypillisessä sovelluskohteessa.

2. Menetelmät

2.1 Tapaustutkimus

Tässä tutkimuksessa tutkittiin sisälämpötilan ilmavirran laskemista yhdessä tyypillisessä luontotilassa (Taulukko 1).

Taulukko 1. Huoneen ominaisuudet

Huoneen ominaisuudet	Yksikkö
Huoneen pinta-ala	100 m ²
Pituus x Leveys x Korkeus	16 m x 6,3 m x 3 m
Rakenteiden U-arvo	0,22 m ² K/W
Ikkunan pituus x korkeus	10 m x 1,5 m
Ikkunan U-arvo	1,9 m ² K/W
Ikkunan lasiosan g-arvo	0,2

Termisen massan vaikutusta tutkittiin raskaiden (Taulukko 2) ja kevyiden (Taulukko 3) rakenteiden tapauksissa. Lämmönläpäisykerroin (U-arvo) molemmissa rakenteissa on sama 0,22 W/(m² K).

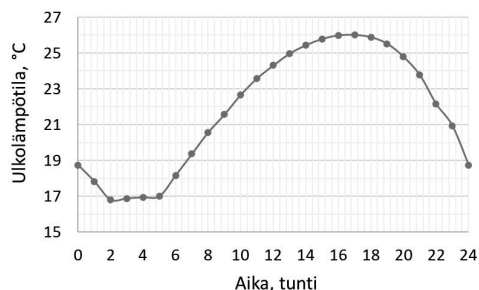
Taulukko 2. Raskaat rakenteet

Rakenne	Materiaali	Paksuus, m	Tiheys kg/m ³	Lämmönjohtavuus W/(m K)	Ominaislämpö J/(kg K)
Betoniseinä	betoni	0,250	2300	1,700	880
	lämmöneristys	0,150	20	0,036	750
Betonilattia	lattiapinnoite	0,005	1100	0,180	920
	lämmöneristys	0,150	20	0,036	750
	betoni	0,250	2300	1,700	880

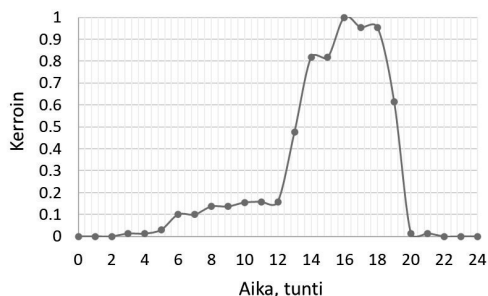
Taulukko 3. Kevyet rakenteet

Rakenne	Materiaali	Paksuus, m	Tiheys kg/m ³	Lämmönjohtavuus W/(m K)	Ominaislämpö J/(kg K)
Puurunkoinen seinä	kipsi	0,026	970	0,220	1090
	palkin kehys	0,195	92	0,052	2010
	kipsi	0,026	970	0,220	1090
	puu	0,025	500	0,140	2300
Katto	lämmöneristys	0,150	20	0,036	750
	puu	0,025	500	0,140	2300
	kipsi	0,026	970	0,220	1090
Lattia	lattiapinnoite	0,005	1100	0,180	920
	lämmöneristys	0,100	20	0,036	750
	kevytbetoni	0,250	500	0,150	1050

Mitoituspäivän sääolosuhteet valitaan dynaamisia laskelmia varten. Mitoituspäivä on valittu Suomen testivuoden TRY 2012 säätiedoista (Kuvat 1a). Auringon tuntikohtainen lämpökuorma laskettiin länsifasadille (Kuva 1b).



a)



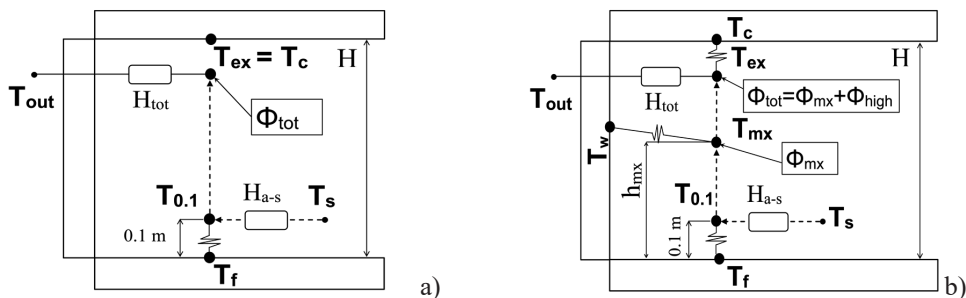
b)

Kuva 1. Mitoituspäivän ulkoilman lämpötilat (a) ja auringon säteilyn tuntiprofili länsifasadilla (b).

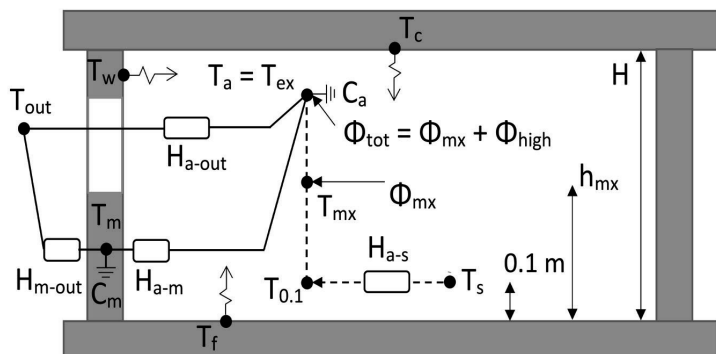
Kokonaislämpökuorma kaikessa tapauksessa koostuu ihmisten (3 kW), valaistuksen (1 kW) ja auringon lämpökuormista (2 kW), ja Kokonaislämpökuorma on 60 W/lattia-m².

2.2 Syrjäytysilmanvaihdon laskentamallit

Mitoitettu tuloilmavirta lasketaan lineaarisen lämpötilakerrostumaan perustuvalla [1,2] ja monivyöhykkeisellä stationaarisilla malleilla (Kuva 2) sekä dynaamisella monivyöhykemallilla [3] (Kuva 3). Malleissa käytetyt symbolit on esitetty Taulukossa 4.



Kuva 2. Stationaariset syrjäytysilmanvaihdon mallit:
 a) Mundtin lineaarisen lämpötilakerrostumaan perustuva malli.
 b) Stationaarinen monivyöhykemalli.



Kuva 3. Dynaaminen syrjäytysilmanvaihdon monivyöhykemalli.

Taulukko 4. Syrjäytysilmavaihdon malleissa käytetyt symbolit

Nimi	Symboli	Yksikkö
Kokonaislämpökuorma	Φ_{tot}	W
Lämpökuorma oleskeluvyöhykkeellä	Φ_{mx}	W
Lämpökuorma ylävyöhykkeellä	Φ_{high}	W
Ulkolämpötila	T_{out}	°C
Ilman lämpötila 0,1 m lattian yläpuolella	$T_{0,1}$	°C
Ilman lämpötila sekoituskorkeudessa	T_{mx}	°C
Poistoilman lämpötila	T_{ex}	°C
Lattian pinnan lämpötila	T_f	°C
Kattopinnan lämpötila	T_c	°C
Seinäpinnan lämpötila	T_w	°C
Huoneen korkeus	H	m
Sekoituskorkeus	h_{mx}	m
Sisäilman ja kalusteiden lämpökapasiteetti	C_a	J/K
Rakenteiden lämpökapasiteetti	C_m	J/K
Kokonaiskonduktanssi	H_{tot}	W/K
Konduktanssi rakenteiden ja sisäilman välillä	H_{a-m}	W/K
Konduktanssi rakenteiden ja ulkoilman välillä	H_{m-out}	W/K
Ikkunan konduktanssi	H_{a-out}	W/K
Ilmanvaihdon konduktanssi	H_{a-s}	W/K

2.3 Dynaamisen laskentamalin lämpökapasiteettien ja konduktanssien laskeminen

2.3.1 Dynaamisten parametrien määrittäminen standartin mukaan

Mallin dynaamiset muuttujat on mahdollista määritellä teoreettisesti ISO/FDIS 13790:2007 standartin mukaan [4] sisäilman ja huonerakenteen fyysisistä ominaisuuksista.

Sisäilman lämpökapasiteetti C_a sisältää sekä ilman että huonekalujen sisäiset terminen massat (yhtälö 1).

$$C_a = \rho_a \cdot c_{p_a} \cdot V_a + \rho_{hk} \cdot c_{p_{hk}} \cdot A_{hk} \cdot \delta_{hk} / 2 \quad (1)$$

missä ρ_a = ilman tiheys, 1,2 kg/m³
 c_{p_a} = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1005 J/(kg·K)
 V_a = ilman tilavuus (m³)
 ρ_{hk} = huonekalujen materiaalin tiheys, 1000 kg/m³
 $c_{p_{hk}}$ = huonekalujen ominaislämpökapasiteetti, 1300 J/(kg·K)
 V_{hk} = huonekalujen tilavuus (m³),
 A_{hk} = huonekalujen pinta-ala (esim. pöydän yläpuolen pinta-ala) (m²)
 δ_{hk} = huonekalujen paksuus (m)

Rakenteiden lämpökapasiteetti C_m lasketaan yhtälöllä 2. Rakenteen tilavuus V_{rak} määritetään pinta-alasta ja tehollisesta paksuudesta.

$$C_m = \sum_i (\rho_{rak} \cdot c_{p_{rak}} \cdot V_{rak})_i = \sum_i (\rho_{rak} \cdot c_{p_{rak}} \cdot \delta_{rak_teh} \cdot A_{rak})_i \quad (2)$$

missä ρ_{rak} = rakenteen tiheys (kg/m³)
 $c_{p_{rak}}$ = rakenteen ominaislämpökapasiteetti (J/(kg·K))
 V_{rak} = rakenteen tilavuus (m³), $V_{hk} = A_{rak} \cdot \delta_{teh}$
 i = rakenne
 A_{rak} = rakenteen pinta-ala (m²)
 δ_{rak_teh} = rakenteen sisäpuolinen tehollinen paksuus(m) [5]

Kokonaiskonduktanssit H_{tot} ja H_{a-m} määritellään seuraavasti:

$$H_{tot} = A_{tot} \cdot U_{tot} = \left(\frac{1}{H_{a-m}} + \frac{1}{H_{m-out}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$H_{a-m} = A_{tot} \cdot h_{is} \quad (4)$$

missä A_{tot} = läpinäkymättömien rakenteiden kokonaispinta-ala (m^2)

U_{tot} = rakenteen kokonaislämmönläpäisykerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)

h_{is} = lämmönsiirtokerroin sisäilman ja rakenteiden välillä, $3,45 W/(m^2 \cdot K)$ [12]

h_{is} = lämmönsiirtokerroin sisäilman ja rakenteiden välillä, $3,45 W/(m^2 \cdot K)$ [12]

Johtumislämmönsiirto jaetaan ikkunan osuuteen H_{a-out} , jonka termien massa on nolla.

Konduktansi rakenteiden ja ulkoilman välillä H_{m-out} lasketaan yhtälöllä 3.

2.3.2 Parametrien määrittäminen simulaatio-ohjelmiston kalibroinnilla IDA-ICE avulla

Tutkimuksessa [3] esitetään rakenteiden dynaamisten mallien parametrien kalibrointimenetelmä simulaatio-ohjelmiston IDA-ICE avulla. Kokonaiskonduktanssi H_{tot} määritettiin stationaarisessa parametrin tunnistamisessa. Dynaamisessa parametrin tunnistamisessa määritettiin kolme malliparametria H_{am} , C_m ja C_a .

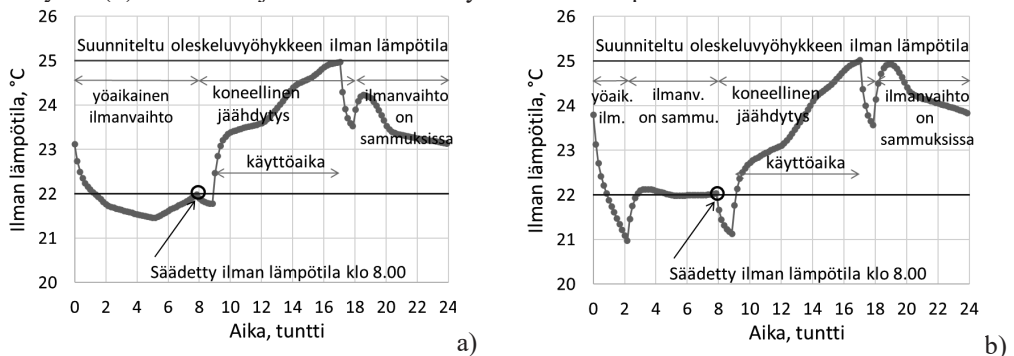
Taulukko 5 esittää kalibroidut ja lasketut dynaamisen laskentamalin parametrit. Erot kalibroituja ja teoreettisesti laskettujen parametrien välillä eivät aiheuta merkittäviä muutoksia sisäilman lämpötilassa ja ilmavirrassa. Tämä tarkoittaa, että analyttisesti määritettyjä parametreja voidaan soveltaa tiloihin, joiden rakenteiden (lattian, seinien ja katon) lämpömassat ovat samanlaisia.

Taulukko 5. Dynaamisen laskentamalin parametrit

Rakenteen tyyppi	Dynaamisen laskentamalin parametrit							
	Ca		Cm		Ha-m		Hm-s	
	Kalib	Teor.	Kalib	Teor.	Kalib	Teor.	Kalib	Teor.
Raskaat rakenteet	1464	1306	60440	58018	1543	1098	73	75
Kevyet rakenteet	1496	1306	13210	14651	1319	1098	74	75

3. Tulokset

Kuvassa 4 esitetään oleskeluvyöhykkeen ilman lämpötilan muutokset päivän aikana raskaalla (a) ja kevyellä (b) rakenteilla ja ilmanvaihdon käyttäjäkatsaus tapauksissa.



Kuva 4. Oleskeluvyöhykkeen ilman lämpötilat laskettuna dynaamisella syrjäytysilmavaihdon monivyöhykemallilla raskaalla (a) ja kevyellä (b) rakenteilla.

Tarvittava tuloilmavirta laskettiin mallinnetulle luentotilalle erilaisilla lämpökuormilla ja käyttöaikatauluilla. Yöaikainen tarpeenmukainen ilmanvaihto säätää oleskeluvyöhykkeen ilman

lämpötilaa ennen käyttöaikaa (kello 8) tasolle 22 °C. Tällä tavalla on mahdollista tutkia sisäilmalämpötilan muutoksia käyttöaikana samasta lämpötilasta alkaen. Tuloilman lämpötila on sama kuin ulkolämpötila yöaikaisen ilmanvaihdon aikana. Koneellisen jäähdytyksen tuloilman lämpötila on vakio 19 °C. Tulokset osoittivat, että kevyet rakenteet reagoivat nopeammin lämpötilan muutoksiin kuin raskaat, ja vaaditut ilmavirtaukset kasvoivat raskaaseen rakenteeseen verrattuna (Taulukko 6). Lineaarinen Mundin malli antaa pienemmän mitoitusilmavirran kuin tarkempi monivyöhykemalli, koska Mundtin malli yleensä aliarvioi oleskeluvyöhykkeen ilman lämpötilaa. Kuitenkin, kun rakennuksen terminen massa ja lämpökuormien ajallinen vaihtelu otetaan huomioon, on Mundin mallin antama ilmavirta riittävä. Raskaissa rakenteissa dynaamisen mallin avulla laskettu tuloilman ilmavirta on jopa 57% pienempi kuin stationaarisiin malleilla.

Taulukko 6. Ilmavirrat syrjäytysilmanvaihdon malleissa

Rakenteen tyyppi	Ilmavirrat syrjäytysilmanvaihdon malleissa, m ³ /s		
	Mundt:n lineaarinen malli	Stationaarinen monivyöhykemalli	Dynaaminen monivyöhykemalli
Raskaat rakenteet	0,43	0,69	0,30
Kevyet rakenteet	0,43	0,69	0,44

4. Yhteenveto ja pohdinta

Dynaaminen syrjäytysilmanvaihdon suunnittelun monivyöhykemalli pystyy ottamaan huomioon rakennuksen termisen massan ja vaihtelevien sisäisten lämpökuormien vaikutuksen pystysuuntaiseen lämpötilakerrostumaan. Dynaaminen mallin parametrit määriteltiin sekä teoreettisesti että mallien parametrien kalibrointimenetelmä simulaatio-ohjelmiston IDA-ICE avulla. Standardin mukaista yksinkertaistettua teoreettista parametrimäärittystä voidaan käyttää tiloissa, joissa on samanlaiset rakenteelliset termiset massat. Raskaissa rakenteissa dynaamisen mallin avulla laskettu tuloilman ilmavirta voi olla merkittävästi pienempi kuin stationaarisiin malleilla laskettu ilmavirta. Dynaamista mallia voidaan soveltaa syrjäytysilmanvaihdon suunnittelussa erilaisissa sovelluksissa, joissa lämpökuormat vaihtelivat ja terminen massa aiheuttaa merkittävän vaikutuksen. Dynaamisen mallin avulla voidaan pienentää merkittävästi tarvittavan ilmanvaihtojärjestelmän mitoitusilmavirtaa, mikä voi vähentää investointikustannuksia ja puhaltimen sähkönkulutusta.

Lähdeluettelo

- [1] Mundt, E. 1995. Displacement ventilation systems – Convection flows and temperature gradients. *Building and Environment*, 30(1), s. 129-133.
- [2] Kosonen, R., Lastovets, N., Mustakallio, P., da Graça, G. C., Mateus, N. M., & Rosenqvist, M. 2016. The effect of typical buoyant flow elements and heat load combinations on room air temperature profile with displacement ventilation. *Building and Environment*, 108, s. 207-219.
- [3] Lastovets, N., Kosonen, R., Mustakallio, P., Jokisalo, J., Kilpeläinen, S.. 2020. Dynamic performance of displacement ventilation in a lecture hall. Taylor and Francis Ltd. *International Journal of Ventilation*, s. 1-11.
- [4] ISO/FDIS 13790:2007 (E). 2000. Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling. TC 163/SC 2, International Organization for Standardisation, Geneva.
- [5] Jóhannesson, G. (1981). Active Heat Capacity, Models and Parameters for the Thermal Performance of Buildings, report TVBH-1003. Lund, Sweden

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron automaattinen mittaus ja säätö

Marko Björkroth ja Ismo Marin
Sweco Talotekniikka Oy

Tiivistelmä

Rakennusten sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron jatkuva mittaus on muuttumassa vakioratkaisuksi. Paine-eron tarkka säätö on työlästä ja ilmavirtojen tarpeenmukainen säätö sekä erillispoistopuhaltimet voivat muuttaa kertaalleen säädettyä paine-eroa. Tämän vuoksi säätö on tarpeen automatisoida. Automaattinen säätö antaa myös mahdollisuuden uudentyyppisiin toimintoihin, kuten rakennuksen säätämisen yli- tai alipaineiseksi ulkoilman olosuhteista riippuen.

Tarve mitata ja säätää paine-eroa tarkasti pitää huomioida rakennuksen suunnittelussa alusta alkaen. Esimerkiksi korkeat rakennukset pitää pystysuunnassa jakaa lohkoihin, jotta terminen paine-ero ei pääse liikaa vaikuttamaan paine-eroihin. Suunnittelussa pitää aina huomioida myös ilmavirtojen säätöpäätarkkuus, joka voi aiheuttaa paine-eroja yksittäisten huonetilojenkin tasolla.

Paine-erojen mittaus ja säätöautomaatio ovat uusia ratkaisuja, mistä aiheutuu tarve ohjeistaa urakoitsijoita, käyttöönoton toimenpiteitä ja käyttöhenkilöstöä yksityiskohtaisilla ohjeilla.

1. Johdanto

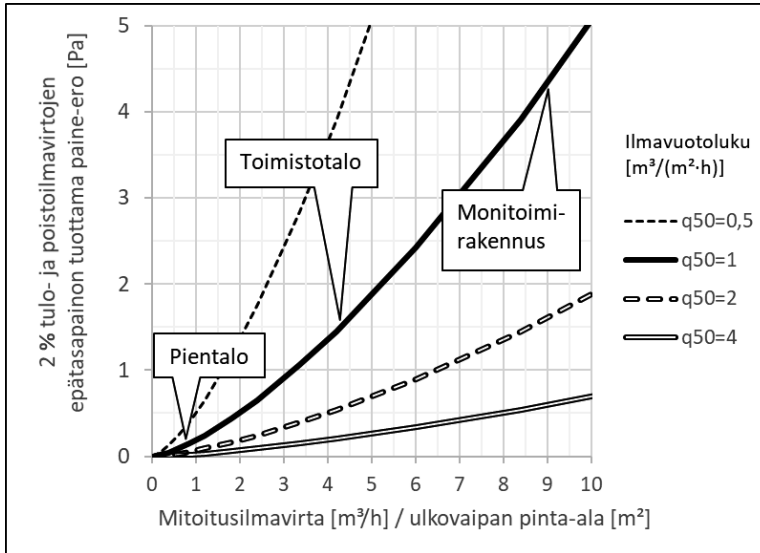
Koneellisilla ilmanvaihtojärjestelmillä on perinteisesti pyritty ylläpitämään alipainetta ulkoilmaan verrattuna. Tavoitteena on ollut ehkäistä lämpimän ja kostean sisäilman vuotaminen rakenteisiin. Alipainetta ei ole kuitenkaan suunniteltu, mitattu eikä säädetty, vaan ratkaisuna on ollut ainoastaan poistoilmavirran mitoittaminen tuloilmavirtaa suuremmaksi. Tämä voi johtaa tarpeettoman suureen alipaineisuuteen rakennuksissa, joiden mitoitusilmavirrat ovat suuria ja ulkovaipan ilmavuotoluku pienempi kuin $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

2000 -luvulla tavoitteet ovat muuttuneet. Nykyään halutaan ehkäistä myös vuotoilmavirtaukset ulkoa sisälle. Ratkaisuina ovat olleet ulkovaipan tiiveyden parantaminen sekä yleisilmanvaihdon suunnittu tasapainoiseksi.

Vaikka ilmanvaihtojärjestelmiä ei enää tarkoituksella suunnitella alipaineistamaan rakennuksia, paine-erot ulkoilmaan verrattuina ovat jopa kasvaneet. Perusongelma on ilmavirtojen varsin heikko mittaustarkkuus. Vaatimustasona ilmavirtojen säädölle on $\pm 10 \%$ tarkkuus järjestelmäkohtaisesti ja $\pm 20 \%$ huonekohtaisesti, sisältäen mittalaitteen virheet. Ilmanvaihtojärjestelmiä pyritään edelleen säätämään varmuuden vuoksi alipaineisiksi ja uusissakin rakennuksissa on käytäntönä mitoittaa ammattikeittiöiden ja muiden erillispoistoilla varustettujen tilojen poistoilmavirrat tuloilmavirtoja suuremmiksi, jotta nämä tilat saadaan pidettyä alipaineisina muihin sisätiloihin verrattuina.

Ulkovaipaltaan epätiivissä rakennuksissa nämä käytännöt eivät johda suuriin paine-eroihin, mutta ulkovaipan ilmatiiveyden parantuessa paine-erot voivat kasvaa liian suuriksi. Ongelma on pahin rakennuksissa, joiden mitoitusilmavirrat ovat suuria. Ongelmaa on havainnollistettu kuvassa 1, jossa vaaka-akselilla on rakennuksen mitoitusilmavirran [m^3/h] ja ulkovaipan pinta-

alan [m²] suhde. Asuin- ja varistorakennusten mitoitusilmavirrat ovat pieniä ja niillä em. suhdeluku on alle 1. Toimistorakennuksilla suhdeluku on noin 4 ja kuvassa 1 paine-eron hallinnan kannalta vaikeaa rakennusta edustaa monitoimirakennus, jossa on sekä opetus- että liikuntatiloja. Tämänkaltaisten rakennusten mitoitusilmavirrat ovat kaksinkertaisia toimistorakennuksiin verrattuna ja ilmanvaihtojärjestelmät monimutkaisempia, koska opetusrakennuksissa on yleensä ammattikeittiö, paljon WC- ja sosiaaliiloja, teknisen työn tilat ja kotitalousluokka.



Kuva 1. Tulo- ja poistoilmavirtojen 2 % epätasapainon tuottaman paine-eron riippuvuus ulkovaipan ilmavuotoluvusta ja mitoitusilmavirran suuruudesta verrattuna ulkovaipan pinta-alaan.

Vaativimmissa kohteissa sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron säätö edes ±5 Pa tarkkuudella edellyttää tulo- ja poistoilmavirtojen säätöä alle 1 % tarkkuudella. Parhaatkaan ilmavirrat mittausratkaisut eivät tähän kykene, joten ilmavirtojen tasapainottaminen pitää tehdä paine-eromittaukseen perustuen.

Jatkuvatoimiset paine-eron mittausjärjestelmät ovat yleistymässä ja suunnitteluohjeissa [1] suositellaan rakennusautomaatiojärjestelmällä varustettuihin kohteisiin jatkuvatoimista iv-koneiden ilmavirtojen ja ulkovaipan yli vaikuttavan paine-eron trendiseurantaa.

Ainakin yhteen kohteeseen [2] on jo toteutettu automaattinen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron säätöjärjestelmä, mutta siinä ei ole huomioitu erillispoistojen käynnistämisen ja pysäyttämisen aiheuttamia äkillisiä muutoksia.

2. Tiiviin rakennuksen manuaalinen säätömenetelmä

Vakioilmavirtajärjestelmällä varustettujen tiiviiden rakennusten säätö voidaan toteuttaa manuaalisena. Tällöin toimintamalli on seuraava:

1. Tilakohtaiset tulo- ja poistoilmavirrat säädetään suunnitelmien mukaisesti, millä taataan riittävä ilmanvaihtuvuus kaikissa tiloissa

2. Mitataan tilakohtaiset paine-erot (yl. paine-ero käytävään verrattuna) hetkellisenä mittauksena [3], tilan tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoa korjataan, mikäli havaitaan liian suuri paine-ero muihin sisätiloihin verrattuna
3. Mitataan seurantamittauksena sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero, iv-koneiden tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoa korjataan tarvittaessa, minkä jälkeen muutosten vaikutus varmistetaan uudella seurannalla

Paine-eron hetkellistä mittausta ulkoseinältä ei voi yleensä käyttää säädön perustana, koska hiljainekin tuuli aiheuttaa vaihtelua mittaustulokseen. Sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa tulee mitata pidempi jakso, tuulisella säällä jopa 2 viikkoa, jotta ilmanvaihdon tuottama paine-ero on mahdollista määrittää tuulen aiheuttamasta häiriöstä huolimatta.

3. Automaattinen paine-eron säätö

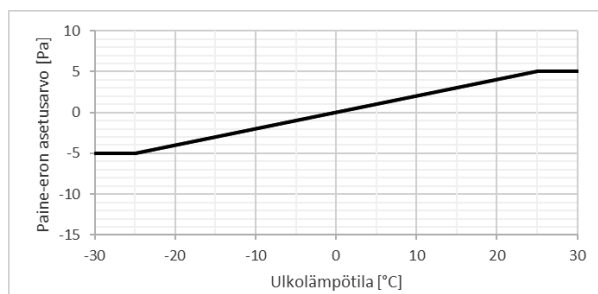
Muuttuvaimavirtaisissa ilmanvaihtojärjestelmissä edellä kuvattu toimintamalli ei toimi. Muuttuvaimavirtaisiksi lasketaan usein vain neuvottelutilojen ja auditorioiden CO₂ pitoisuuden ja lämpötilan mukaan ilmavirtaa säätävät järjestelmät, mutta poistoilmavirtaa säädellään käyttötilanteen mukaan myös useimmissa ammattikeittiössä, laboratoriossa ja jopa vetokaapeilla varustetuissa koululuokissa. Erityisen haastaviksi paine-eron hallinnan kannalta ovat osoittautuneet myös koulujen teknisen työn luokat.

Muuttuvaimavirtaisen järjestelmän pitää kyetä ylläpitämään tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoa ja sen tulee reagoida muutoksiin nopeasti ts. paine-eron säädön tulee olla täysin automaattista. Peruseriaate on silti sama kuin manuaalisessa säädössä – tulo- ja poistoilmavirrat säädetään ilmavirtamittauksien perusteella likimain tasapainoon ja lopuksi tehdään hienosäätö paine-eromittauksen perusteella.

Jotta sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa voidaan säätää automaattisesti, pitää rakennuksen suunnittelussa huomioida seuraavat asiat.

3.1 Vyöhykejako

Rakennus tulee tarvittaessa jakaa vyöhykkeisiin, joiden paine-eroa mitataan ja säädetään erikseen. Jokaiselle vyöhykkeelle pitää määrittää sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron tavoitearvo. Automaattista säätöä käytettäessä tavoitearvon ei ole pakko olla vakioarvo, vaan se voi olla esimerkiksi ulkolämpötilasta tai sisäilman kosteuslisästä riippuva.



Kuva 2. Esimerkki siitä, miten automaattisessa paine-eron säätöjärjestelmässä paine-eron tavoitearvo voidaan määrittää ulkolämpötilasta riippuvana.

Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas [1] ohjeistaa jakamaan korkeiden rakennusten

ilmavaihtojärjestelmän pystysuunnassa vyöhykkeisiin, joissa ylimmän ja alimman päätelaitteen korkeusero on $D_{max} = 600 / (t_{sisälämpötila} - t_{mitoituskolämpötila})$. Mitoituslämpötiloilla $+21\text{ °C}$ ja -29 °C vyöhykkeen enimmäiskorkeudeksi tulee tasan 12 m. Tämän perusteella enintään 3-4 kerroksiset rakennukset voidaan toteuttaa yhtenä vyöhykkeenä, mutta korkeat tulee jakaa pystysuunnassa erillisiin säätövyöhykkeisiin. Useimmissa tapauksissa säätö on järkevintä toteuttaa kerroskohtaisena.

Mikäli paine-eron tavoitearvot poikkeavat toisistaan rakennuksen eri osissa, joko erilaisen käyttötarkoituksen tai erilaisten rakenneratkaisujen vuoksi, rakennus pitää jakaa vyöhykkeisiin myös vaakasuunnassa.

3.2 Hallitut vuotoreitit

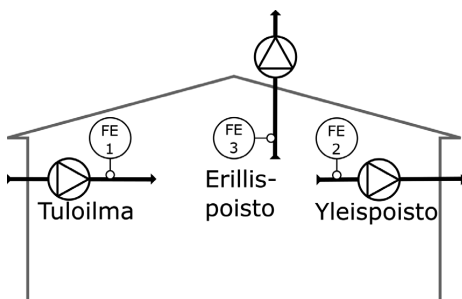
Ilmavirtojen mittausepätarvkuuden vuoksi yksittäisten huonetilojen tulo- ja poistoilmavirrat voivat olla erisuuruiset, jolloin nämä tilat muuttuvat yli- tai alipaineisiksi muihin sisätiloihin verrattuna. Paine-erot voivat kasvaa suuriksi etenkin auditorioiden kaltaisissa tiloissa, missä on suuret mitoitusilmavirrat ja äänieristyvaatimusten vuoksi tiiviit väliseinärakenteet.

Ilmavirtojen epätasapainon aiheuttamaa paine-eroa voidaan rajoittaa hallitulla vuotoreitillä, esimerkiksi oviraolla tai väliseinään tai alaslaskettuun kattoon asennettavalla, ääntä vaimentavalla, siirtoilmalaitteella.

Mikäli siirtoilmaa ei voida käyttää ilmavirtojen epätasapainon tasaamiseen, voi olla tarpeen varustaa kyseinen tila tilakohtaisella paine-eromittauksella ja tasapainotusautomaatiolla.

3.3 Automaattinen ilmavirtojen tasapainotus

Ilmavirtojen automaattinen tasapainotus tarkoittaa, että kaikki ilmavirrat mitataan ja automaatiojärjestelmä säätää ilmavirrat tasapainoon. Kuvan 3 esimerkkitapauksessa pitää toteutua $q_{tuloilma} - q_{yleispoisto} - q_{erillispoisto} = 0$. Kun säädettäväksi ilmavirraksi valitaan yleispoiston ilmavirta, sen asetusarvo on $q_{yleispoisto} = q_{nuloilma} - q_{erillispoisto}$.



Kuva 3. Ideaalitilanne, jossa kaikki vyöhykkeen tulo- ja poistoilmakanavat on varustettu jatkuvatoimisella ilmavirtamittauksella.

Erillispoistojen ilmavirta voidaan mittauksen sijaan myös arvioida. Tällöin tasapainotuslaskennassa käytetään puhaltimen käyntitilatieta ja poiston mitoitusilmavirtaa. Tämä ratkaisu on mielekäs, kun erillispoiston ilmavirta on pieni tai jatkuvan mittauksen toteuttaminen vaikeaa poistoilman likaisuuden tai syövyttävyyden vuoksi.

3.4 Automaattinen paine-eron säätö

Automaattinen paine-eron säätö pyrkii säätämään mitatun paine-eron tavoitearvoonsa muuttamalla säätövyöhykkeen tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoa. Tämä toteutetaan summaamalla säädettävän ilmavirran asetusarvoon paine-erosta riippuva korjaustermi $q_{\text{paine-erokompensointi}}$, jolloin kuvan 3 esimerkkitapauksessa ohjattavan ilmavirran tulee olla $q_{\text{yleispoisto}} = q_{\text{tuloilma}} - q_{\text{erillispoisto}} + q_{\text{paine-erokompensointi}}$.

Paine-eron säätöautomaatio saa tehdä vain hyvin pieniä, muutaman prosentin suuruisia muutoksia säädettävään ilmavirtaan. Tällä ehkäistään hallitsemattomat ilmavirtojen ja paine-erojen muutokset häiriötilanteissa.

Paine-eron säätöautomaation kannalta häiriötilannetta edustaa jopa avoin ulko-ovi tai ikkuna. Kun ovi tai tuuletusikkuna on avoinna, paine-ero ulkoilmaan verrattuna on nolla. Jos paine-eron tavoitearvo on esimerkiksi -5 Pa, niin oven tai ikkunan ollessa pitkään auki säätöjärjestelmä säätää poistoilmavirran mahdollisimman suureksi pyrkiessään kasvattamaan alipainetta. Tämän seurauksena tila muuttuu hetkellisesti hyvin alipaineiseksi, kun ovi tai ikkuna suljetaan.

Jotta ehkäistään voimakkaat paine-eron vaihtelut tämän kaltaisissa tilanteissa, tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoon tehtävät muutokset pitää rajoittaa mahdollisimman pieniksi. Raja-arvot pitää aina määrittää tapauskohtaisesti, koska niihin vaikuttavat rakenteiden tiiveys, mitoitusilmavirtojen suuruus ja ilmavirtojen mittausepätaarkkuus.

3.5 Paine-eron mittaus

Paine-eron mittaus voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla

1. Suora sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaus ulkoseinältä
2. Huone vs. käytävä, aula tai porrashuone
3. Usealle mittauspisteelle yhteinen mittauslinja

Mittaus ulkoseinältä soveltuu vain tuulensuojaisaan ympäristöön. Tuulelle alttiilla rakennuspaikoilla ja korkeissa rakennuksissa hiljainenkin tuuli aiheuttaa kymmenien ja kova tuuli satojen pascalien vaihtelua mittaustulokseen. Tuulen aiheuttaman häiriön vähentämiseksi säädöstä joudutaan tekemään hitaasti reagoiva.

Kahden tilan väliseen paine-eromittaukseen perustuva säätö soveltuu hyvin yksittäisen huonetilan, kuten auditorion tai teknisen työn luokan, säätöön. Kun yksittäisten tilojen paine-eroa säädetään suhteessa käytävään tai porrashuoneeseen, pitää mitata myös kyseisen käytävän tai porrashuoneen paine-ero ulkoilmaan verrattuna.

Paine-eron mittauslinjalla tai referenssijohdella tarkoitetaan rakennuksesta ulos johdettavaa mittausputkea, johon liitetään useita tilakohtaisia paine-eromittauksia. Mittauslinja johdetaan ulos mahdollisimman tuulensuojaisessa paikassa. Mittauslinja soveltuu erityisesti maanalaisiin tiloihin ja korkeisiin rakennuksiin, joissa mittaus ulkoseinältä ei toimi tuulenpaineen vuoksi. Myös mittauslinjassa vaikuttava terminen paine-ero pitää huomioida laskennallisesti. Mittauslinjaa ei tule sijoittaa putkikuilun kaltaiseen tilaan, jonka lämpötila voi poiketa sisätilojen lämpötilasta, koska tämä aiheuttaisi virhettä mittaustuloksiin.

4. Vaatimukset suunnittelulle

Paine-eron hallinta edellyttää uudenlaista yhteistyötä suunnittelijoiden välillä. Rakenne- ja ilmanvaihtosuunnittelijoiden tulee yhdessä määrittää, millainen sisäilman kosteusliä rakennuksen eri käyttötilanteissa on ja mikä on paine-eron tavoitetaso. Rakennus pitää tarpeen mukaan jakaa erillisiin paine-eron säätövyöhykkeisiin, jotka pitää erottaa toisistaan tiiviillä väliseinillä – toisaalta vyöhykkeen sisällä pitää ehkäistä paine-erojen muodostumista tilojen välille esimerkiksi siirtoilmalaitteilla. Tämän vuoksi paine-erojen hallintatarve tulee huomioida arkkitehtisuunnittelussakin.

Automaatio ja iv-suunnittelijoiden tulee yhdessä määrittää, miten paine-eron ja ilmapirtojen mittaukset sijoitetaan ja miten huomioidaan erillispoistojen ilmapirrat, joita ei varusteta jatkuvatoimisella ilmapirtamittauksella.

Asia on uusi myös urakoitsijoille, joten rakennuksen käyttöönottovaiheessa tarvittavien säätöjen ja asetusarvojen määrittämisen toteutus pitää kuvata suunnitelmissa yksityiskohtaisesti. Ohjeistusta tarvitaan myös ylläpitoon.

5. Yhteenveto

Suurin haaste sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron säädön automatisoinnissa on tuulenpaineen vaihtelu. Tuulenpaineen vaihtelun aiheuttamaa häiriötä voidaan vähentää mm. käyttämällä useille mittauspisteille yhteistä mittauslinjaa sekä turvautumalla hetkellisten arvojen sijaan pidemmän ajanjakson keskiarvoihin. Keskiarvotus kuitenkin hidastaa järjestelmän kykyä reagoida äkillisiin muutoksiin, kuten erillispoistopuhaltimen käynnistymiseen.

Tämän vuoksi säätö pitää toteuttaa kaskadisäätönä, jossa automaatio säätää tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoa ilmapirtamittauksiin perustuen ja tätä ilmapirtojen tasapainoa poikkeutetaan paine-eromittauksen perusteella niin, että paine-ero saadaan säädettyä asetusarvoonsa.

Automaattisen paine-eron säätöjärjestelmän suunnittelu edellyttää totuttua laajempaa yhteistyötä eri suunnittelualojen (ARK-RAK-LVI-RAU) välillä. Suunnitelmien pitää olla yksityiskohtaiset ja ohjeistus tarvitaan myös järjestelmien käyttöönotolle, säädölle ja ylläpidolle, koska ratkaisut ovat uusia myös urakoitsijoille ja ylläpitohenkilökunnalle.

Lähdeluettelo

- [1] Talotekninen teollisuus ja kauppa ry. 2021. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas, päivitetty 11.6.2021. <https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>
- [2] Janhunen, T. Ilmanvaihtokoneen ilmapirtojen säätö palvelualueen mitattuun paine-eroon perustuen. 2021. Opinnäytetyö. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- [3] Björkroth, M. Eskola, L. 2019 Rakennusten paine-erojen mittausohje -projektin loppuraportti. https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/rakennusten_paine-erojen_mittausohje_2019-10-11.pdf

Korkean rakennuksen luonnollisten ilmavirtauksen hallinta ja hyödyntäminen

Ilari Ranta-aho
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa käsitellään hormivaikutusta sekä sen hyödyntämistä yli 85 m korkeissa rakennuksissa. Hormivaikutus tarkoittaa sisä- ja ulkolämpötilaeron, sekä korkeuseron yhdessä aikaansaamaa termistä paine-eroa. Korkeissa rakennuksissa esiintyy voimakkaita hallitsemattomia hormivaikutuksen aiheuttamia paine-eroja sekä vuotoilmavirtauksia. Hallitsemattomat vuotoilmavirrat vaikuttavat haitallisesti energiakulutukseen ja ilmanvaihdon toimintaan. Tiiviiden rakenneosien välille syntyvät paine-erot vaikeuttavat ovien käytettävyyttä ja toimintaa. Hormivaikutusta ei voida poistaa, mutta hormivaikutus voidaan saada hallintaan arkkitehtuurisilla ja rakenteellisilla ratkaisuilla. Hormivaikutuksen aiheuttamiin vuotoilmavirtauksiin rakennuksen sisällä voidaan vaikuttaa rakennerratkaisuilla, jotka estävät ilmavirtauksia ulkoa kuiluihin. Rakennerratkaisuista hallitsemattomia vuotoilmavirtauksia esiintyy rakennuksessa, joita ei voida hallita koneellisella ilmanvaihdolla. Vuotoilmavirtauksia tulisi hallita ja hyödyntää hissi- ja porraskuilujen ilmanvaihtoon.

1. Johdanto

Korkeiden rakennusten kuiluissa syntyy voimakas terminen paine-ero eli hormivaikutus. Hormivaikutus syntyy sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron vaikutuksesta. Lämmin sisäilma virtaa luontaisesti ylöspäin rakennuksen kuiluissa poistuen ulos rakennuksen yläosien vuotokohdista. Kuiluihin virtaa ilmaa rakennuksen alaosien vuotokohdista. Hormivaikutuksen voimakkuuteen vaikuttaa ulko- ja sisäilman lämpötilaeron suuruus sekä rakennuksen kuilujen korkeus.

Korkean rakentamisen rajana Suomessa pidetään, kun rakennettava rakennus on 16 kerrosta tai yli (mukaan lukien mahdolliset kellarikerrokset), jolloin hankkeissa sovelletaan Helsingin kaupungin Korkean rakentamisen ohjekortteja. Rakentamistapaohjeen ohjekortit 2018 on laadittu selvittämään korkeassa rakentamisessa vaadittavia lisäselvityksiä. Rakentamistapaohjeessa on ohjekortti hormivaikutuksen hallintaan. Ohjekortti antaa neuvoja ja vinkkejä hormivaikutuksen hallinnan liittämistä korkean rakentamisen suunnitteluprosessiin.

Hormivaikutuksella voi olla monia haitallisia vaikutuksia, kuten:

- Normaalista suurempi energian- ja tehontarve (erityisesti tilalämmityksen osalta).
- Haitallisen suuret paine-erot esim. ovien ja avattavien ikkunoiden yli.
- Epäpuhtauksien siirtyminen rakenteista sisäilmaan ja tilojen välillä.
- Sisäolosuhteiden heikentyminen (esim. lämpötila ja vedon tunne).

Hormivaikutukset aiheuttamat ongelmat yleensä esiintyvät yli 85 metriä korkeissa rakennuksissa, jolloin terminen paine-ero kasvaa huomattavan suureksi eikä siihen voida enää vaikuttaa tavanomaisilla ilmanvaihtoratkaisulla. Hormivaikutuksen ongelmat keskittyvät yleensä hissikuilun ympäristöön, johtuen hissien ovien epätiiveyksistä. Ongelmat pahenevat mitä helpompi reitti hissikuilusta on ulkoilmaan. Tyypillisesti suurien vuotoilmavirtojen aiheuttamat ongelmat esiintyvät rakennuksen alaosissa, johtuen sisäänkäynneistä ja muista toisarvoisista tiloista, joiden tiiveyksiin ei kiinnitetä huomiota rakentamisen aikana. Rakennuksen yläosat

muodostuvat tyypillisesti asunnoista/toimistotiloista joiden viimeistelyissä ilmanpitävyyteen kiinnitetään huomiota. Rakennuksen yläosissa kuiluista ulos pyrkivä ilma aiheuttaa suuria paine-eroja rakennuksen yläosien ilmanpitävien rakenneosien välillä.

Hormivaikutuksen aiheuttamat ilmavirrat kuiluissa vaikuttavat myös kuilun, hissiaulan sekä hissikonehuoneen ilmanvaihtoon. Tavanomaiset ilmavirrat kuiluissa ja hissikonehuoneissa eivät pysty vastustamaan hormivaikutuksen aikaansaamia luonnollisia ilmavirtauksia. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto ei toimi tarkoituksen mukaisesti korkean rakennuksen kuilujen olosuhteissa kaikissa ulkoilman olosuhteissa. Korkean rakennuksen porras- ja hissikuilujen ilmanvaihtoratkaisuissa tulee ottaa huomioon termisen paine-erosta johtuvat ilmavirtaukset ja niiden vaikutukset rakennukselle.

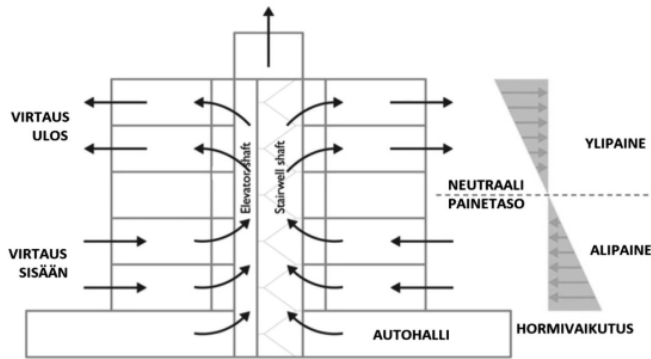
2. Korkean rakennuksen luonnollisten ilmavirtauksien hallinta ja hyödyntäminen

Hormivaikutusta korkeassa rakentamisessa on tutkittu kahdessa Diplomitöissä vuonna 2014 Christina Nybergh (Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa) sekä 2016 Ilari Ranta-aho (Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa). Diplomitöiden mukaan korkeissa rakennuksissa on havaittu kylmän sään aikaan hormivaikutuksen aiheuttamia ongelmia, haitallisia paine-eroja sekä vuotoilmavirtoja. Hormivaikutukseen (termiseen paine-eroon) ja vaikutuksiin suomalaisessa korkeassa rakentamisessa ei ole suunnitteluvaiheessa kiinnitetty huomiota vähäisen tiedon ja opastuksen puutteen vuoksi [5].

Hormivaikutusta esiintyy kaikissa rakennuksissa. Sitä on hyödynnetty rakennusten ilmanvaihtoon, esimerkiksi tavanomaisessa matalassa kerrostaloissa yleisesti porrashuoneen/-kuilun ilmanvaihtoon, aina 2000-luvun alkuun asti, kunnes energiamääräyksen tiukentuiivat. Tavanomaisessa rakentamisessa ilmavirrat ja paine-erot eivät kasva käyttöä haittaavalle tasolle. Tyypillisesti noin 85-metriä ja sitä korkeampien rakennuksien kuiluissa syntyvät hormivaikutus aiheuttaa rakennuksen käyttöä haittaavia ongelmia, kuten suuret paine-erot ovien yli, mitkä vaikeuttavat kulkua ovesta sekä äänenvoimakkuudeltaan häiritsevän suuret vuotoilmavirrat ovien raoissa. Hormivaikutuksen aiheuttamia vuotoilmavirtauksia ei voida hallita koneellisilla ilmanvaihtoratkaisulla, koneellisesta ilmanvaihdosta huolimatta korkeaan rakennukseen kulkeutuu ja poistuu ilmaa luonnollisten voimien. Tästä johtuen esimerkiksi vuotoilmavirtoja tulisi hallita rakenteellisesti ja ilmavirtaukset tulisi hyödyntää rakennuksen ilmanvaihtoon.

2.1 Terminen paine-ero

Hormivaikutuksen eli termisen paine-eron aiheuttaa tiheysero kylmän raskaamman ulkoilman ja tiheydeltään harvemman lämpimän sisäilman välillä. Termisen paine-eron suuruus on verrannollinen rakennuksen korkeuteen ulko- ja sisätilojen lämpötilaeroon. Rakennuksiin syntyy hormivaikutuksen vallitessa neutraali painetaso (NPL), jonka kohdalla ulko- ja sisäilman paineet ovat yhtä suuret. Neutraali painetaso muodostuu keskelle rakennusta, jos rakennuksen ala- ja yläosan vuotoaukot ovat yhtä suuria. Ulkoilmaa lämpimämpi ilma virtaa rakennuksen sisällä ylöspäin kuiluja pitkin rakennuksen yläosiin. Rakennuksen alaosiin muodostuu alipaine, alipaineen johdosta rakennuksen alaosiin virtaa vuotoilmaa ulkovaipan vuotokohdista. Rakennuksen yläosaan muodostuu ylipaine, jonka vaikutuksesta lämmin sisäilma vuotaa ulkovaipan vuotokohdista ulos. [8.] Hormivaikutuksen periaate on korkeassa rakennuksessa esitetty kuvassa 1.



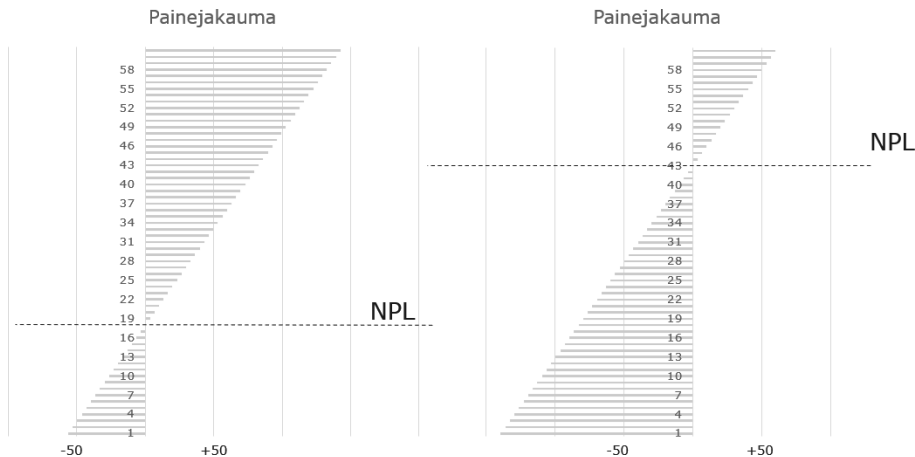
Kuva 1. Hormivaikutus ja sen aiheuttamat ilmavirrat rakennuksessa [6].

Terminen paine-ero voidaan laskea tietyllä korkeudella, kun vuotoaukkojen pinta-alat jakautuvat tasaisesti rakennuksessa. Paine-ero vaipan yli laskea vakioilämpötilassa korkeuserolla Δh neutraalista painetasosta kaavalla. [3].

$$pp = (\rho_{ss} - \rho_{uu})gg \quad (1)$$

missä s = sisäilman tiheys [kg/m^3]
 u = ulkoilman tiheys [kg/m^3]
 g = putoamiskiihtyvyyys [$9,81 \text{ m/s}^2$]
 Δh = korkeusero neutraaliin painetasoon verrattuna [m].

Kun rakennuksen vuotoaukot eivät ole jakautuneet tasaisesti rakennuksen ala- ja yläosien välillä neutraalipainetaso sijainti muuttuu kuvan 2 mukaisesti kohti rakennuksen ala- tai yläosaa.

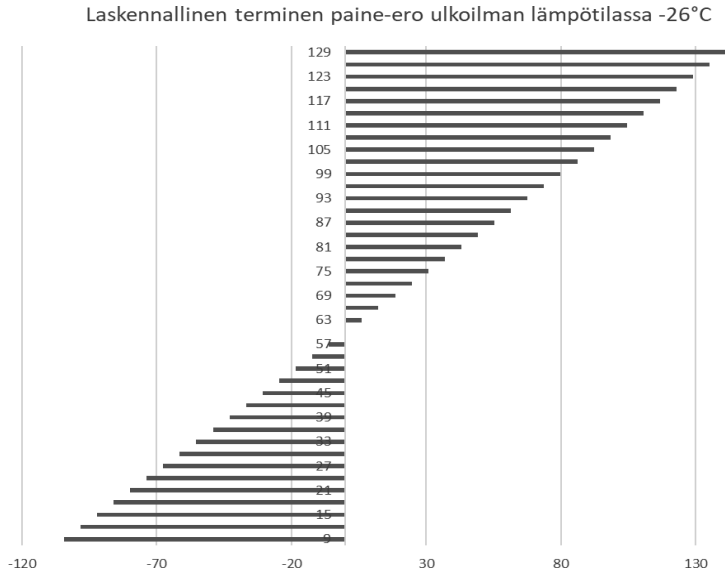


Kuva 2. Neutraaliakselin sijaintiin vaikuttavat rakennuksen alaosien vuotoalat suhteessa yläosan vuotoaloihin. Vasemmalla alaosan ilmavuodot ulkoilmaan ovat suurempia kuin yläosan. Oikealla yläosan ilmavuodot ulkoilmaan ovat suurempia kuin alaosan.

Kuvan 2 vasemmanpuoleinen kuvaaja kuvaa yleistä korkean rakentamisen tilannetta, jossa rakennuksen ulko-ovi avataan hissiaulaan. Avoimen ulko-oven kautta ilmavirta hissikuiluun kasvaa, kuiluun virrannut ulkoilma kasvattaa paine-eroja rakennuksen yläosissa. Tästä ilmiöstä johtuen korkeaan rakennukseen suositellaan pyöröovea sisäänkäynteihin.

2.2 Ilmavirrat ja paine-erot korkeassa rakentamisessa

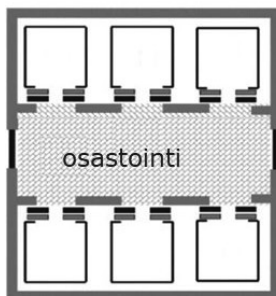
Terminen paine-ero ilmenee rakennuksessa vuotoilmavirtoina sekä paine-eroina tilojen sekä sisä- ja ulkoilman välillä. Alla olevassa kuvassa 3 laskennallinen termien paine-ero 130 metriä korkean rakennuksen hissikuilussa.



Kuva 3. Laskennallinen termien paine-ero 130 metriä korkean rakennuksen hissikuilussa. Vaaka-akselilla paine-ero [Pascal] ja pystyakselilla rakennuksen hissikuilun korkeus [metri].

Paine-erot ja vuotoilmavirrat jakautuvat rakenneosien tiiveyksiensä suhteessa kuilujen ja ulkoilman välillä. Hissien ovien koskevien standardien johdosta hissien ovet eivät ole ilmanpitäviä. Termien paine-ero ilmenee hissikuilun ja hissiaulan välillä tyypillisesti häiritsevänä vuotoilmavirtana, etenkin kerroksissa, joissa on uloskäynti. Haitallisen suuria yli 70 Pa paine-ero esiintyy esimerkiksi asuntojen ja hissiaulan välillä, koska se on ilmanpitävä rajapinta. Yli 70 Pa paine-ero tarkoittaa 100 N voimaa tavanomaisen lehtioven aukaisuun.

Jotta hallitsemattomia ilmavirtauksia voidaan ehkäistä, tulee kuilujen olla ilmanpitäviä. Korkeassa rakennuksessa tulisi hissikuilut osastoida ilmanpitävällä eteisellä/hissiaulalla [8]. Kuvassa 4 on esitetty periaate hissikuilun ilmantiiveyttä parantavasta osastoinnista [7].



Kuva 4. Hissikuilun ilmantiiveyden parantaminen osastoivilla ovilla.

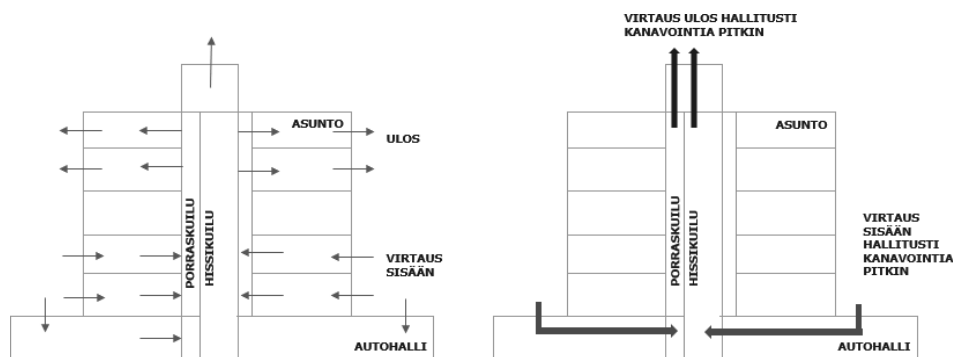
Osastointi vähentää sisäisiä ilmavuotoja rakennuksen sisällä. Ja mm. asuntojen ovien käyttö helpottuu, koska haitalliset paine-erot keskittyvät osastoivan rakenteen yli. Ilmanvirtauksista johtuvat ääniongelmät vähenevät ja niiden mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet, hajut sekä tulipalon aiheuttama savu leviävät vähemmän. Rakennus, jonka hissi- ja porraskuilut ovat osastoitu on myös energiatehokkaampi. [2]

23 Ilmanvaihto korkeassa rakennuksessa

Korkean rakennuksen ilmanvaihtoa suunniteltaessa on ymmärrettävä vallitsevat luontaiset olosuhteet rakennuksen sisällä. Kuilun tiivistäminen vähentää hallitsemattomia ilmavirtauksia, mutta kasvattaa paine-eroja osastoivien rakenteiden rajapinnoilla. Suuret paine-erot kuilujen ympäristössä vaikuttavat koneellisen ilmanvaihdon toimintaan. Ilmanvaihdon kanavistoista tulee tiividen kuilujen pääasialliset vuotoreitit. Kuiluissa palvelevat koneelliset tulo- ja poistoilmanjärjestelmät altistuvat suurille luontaisille ilmavirtauksille, aiheuttaen ilmavirtojen kääntymistä tuloilmakanavistoissa rakennuksen yläosissa sekä poistoilmareittien kääntymistä rakennuksen alaosissa. Luontaisten ilmavirtojen vaikutusta ilmanvaihtoon ei voida poistaa määräyksien mukaisilla mitoitusilmavirroilla. Termisen paine-eron aiheuttamien vuotoilmavirtojen hallinta ilmanvaihdolla tarkoittaa suhteettoman suuria ilmavirtoja. [8].

Väärin toimivat koneelliset ilmanvaihtojärjestelmät kanavistoineen heikentävät myös rakennuksen ulkovaipan- ja sisäosien tiiveyksiä. Rakennuksen painesuhteet vaihtelevat voimakkaasti vuoden ajan mukaan. Tästä johtuen korkean rakennuksen luontaisia ilmavirtoja tulee hyödynnettävä rakennuksen kuilujen ilmanvaihtoon. Hormivaikutuksen aiheuttamille ilmavirtauksille on suunniteltava kanavisto ulkoa kuiluihin. Kuilujen sekä niiden ilmanpitävyyttä parantavien osastoitien ilmanvaihdon palvelualueita ei saa yhdistää muihin ympäröiviin tiloihin, jotta termisen paine-eron aiheuttamat ilmavirrat saadaan hallitusti johdettua kuiluihin ja sieltä ulkoilmaan.

Hallituista ja suunnitelluista hormivaikutuksen aiheuttamista ilmareiteistä tulee ottaa lämpöenergia talteen energiatehokkuuden parantamiseksi. Ilmavirtauksia tulee myös ohjata vuodenajan mukaan esimerkiksi nykyaikaisilla ultraääni-ilmavirtasäätimillä. Näin voidaan varmistaa vähintään määräyksen mukaiset ilmavirrat kuiluissa kaikkina vuoden aikoina. Alla olevassa kuvassa 5, on esitetty kuilujen luontaisen ilmanvaihdon kanavointi periaate verrattuna tavanomaisen korkean rakennuksen hallitsemattomien vuotoilmavirtojen reitteihin.



Kuva 5. Vasemmalla kuvassa tavanomainen korkean rakennuksen termisen paine-eron aiheuttamien ilmavirtojen reitit. Oikealla kuvassa korkean rakennuksen termisen paine-eron aiheuttamien ilmavirtojen reitit, jossa kuilut ovat osastoitu ja rakennuksen ylä- ja alaosissa on kanavavoinnit ilmareiteille.

Hormivaikutuksen aiheuttamat ilmavirtat kuiluissa ovat tyypillisesti sadoista litroista useampaan ilmakuultioon sekunnissa. Suurista ilmavirroista johtuen lämpöenergia talteenotto energiatehokkuuden parantamiseksi on järkevää. Lämmöntalteenottoon voidaan hyödyntää esim. poistoilmälämpöpumppu-ratkaisua.

3. Yhteenveto

Korkeassa rakennuksessa ei voida poistaa hormivaikutusta, mutta hormivaikutus voidaan saada hallintaan rakenteellisilla ja taloteknisillä ratkaisuilla. Korkeassa rakennuksessa tulisi hissi- ja porraskuilut varustaa ilmanpitävillä osastoinneilla. Kuilujen osastointi tarkoittaa, että rakennuksen hissi- ja porraskuilut erotellaan rakennuksen muista tiloista tiiviillä eteisellä. Paineerot osastoivilla ovilla nousevat haitallisen korkeiksi kovilla pakkasilla, vaikuttaen ovien käytettävyyteen. Osastoivien ovien tulisi toimia korkeista paine-eroista huolimatta, osastoivan oven tulisi olla sähköavusteinen. Osastoinneista huolimatta hormivaikutus aiheuttaa merkittäviä ilmavirtauksia hissi- ja porraskuiluissa vaikuttaen mm. tavanomaisten koneellisten ilmanvaihtoratkaisujen toimintaan kuiluissa. Korkean rakennuksen porraskuiluissa tulisi hyödyntää termisen paine-eron mahdollistama luonnollinen ilmavirtaus. Luonnollisille ilmavirtauksille on suunniteltava kanavisto ulkoa kuiluihin. Hallituista ja suunnitelluista vuotoilmareiteistä tulee ottaa lämpöenergia talteen energiatehokkuuden parantamiseksi. Kuilujen ja niiden osastointien ilmanvaihtoa, ei tulisi yhdistää rakennuksen muiden tilojen ilmanvaihtoon, jotta luonnollinen ilmanvaihto toimisi hallitusti.

Lähdeluettelo

- [1] Helsingin kaupunki. 2018. Ohjekortit. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018.
- [2] Jo, Jae-Hun et al. 2007a. Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high residential buildings. *Building and Environment*. [Verkkolehti] Vol. 42 s. 263–277. [Viitattu 04.09.2021] DOI 10.1016/j.buildenv.2005.07.002. ISSN 0360-1323.
- [3] Liddament, Martin. 2006. Distant learning vocational training material for the promotion of best practice ventilation energy performance in buildings. *Ventilation*. VENT
- [4] Dis.Course Module 1: Natural and Hybrid. VeeTech Ltd.
- [5] Nybergh, Christina. 2014. Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Espoo.
- [6] Plescia, Silvio 2013. Air Leakage Control in Multi-Unit Residential Buildings. RDH Building Engineering Ltd. 15 s. [Verkkodokumentti] saatavissa: <http://rdh.com/research-forensics/publications/>. [Viitattu: 05.09.2021]
- [7] Ranta-aho, Ilari. 2016. Hormivaikutuksen aiheuttaminen painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Aalto-yliopisto. Energia- ja LVI-tekniikan laitos. Espoo.
- [8] Simmonds, Peter. 2015. ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall and Megatall Building Systems. Atlanta, USA: ASHRAE. s. 37-50. ISBN 978-1-936504-97-8.

Rakennuksen tiiviys ja ilmanvaihdon suunnittelun ohjeistus

Lari Eskola
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon ohjeita tarvitaan sekä vakioilmavirta- että muuttuvailmavirtajärjestelmille. Uudet ohjeet tarvitaan ensisijaisesti ilmanvaihtojärjestelmän epätasapainon tuottaman paine-eron hallitsemiseksi.

Ilmanvaihdon suunnittelussa tarvitaan tiiviiden rakennusten ($q_{50} < 2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) erityispiirteiden huomioonottamista. Tarkoituksena on, että uusien ohjeiden avulla voidaan paremmin ehkäistä hallitsemattomia ilmavirtoja ja epäpuhtauksien kulkeutumista sisäilmaan rakenteiden vuotoreittien kautta.

1. Johdanto

Tässä artikkelissa tuodaan esiin niitä asioita, joita tulisi ottaa huomioon laadittaessa ulkovaipaltaan tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon suunnittelu- ja säättöohjeita. Uudelle ohjeistukselle on tarvetta, jotta rakennuksen sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero pysyy hallittuna. Paine-erojen ja ilmavuotojen hallinnan haasteet koskevat ilmanvaihdon, ilmanvaihdon automaation ja rakenteiden suunnittelua ja kytkeytyvät myös arkkitehtuuriin. Huomioon otettavat asiat on tarkoitettu ensisijaisesti uudisrakennuksille, joissa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto ja joiden ulkovaipan ilmavuotoluku on $2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ tai pienempi. Valtaosa uudisrakennuksista kuuluu tähän ryhmään, rakennusmateriaalista riippumatta.

Tässä artikkelissa esitetyt ehdotuksia voi olla tarpeen soveltaa myös vanhaa rakennuskantaa korjattaessa, erityisesti tiivistyskorjausten yhteydessä.

2. Ilmanvaihdon mitoitus

Ilmanvaihdon ensisijainen mitoituskriteeri on henkilöperusteinen. Myös mitattavana suurena hiilidioksidipitoisuutta voidaan käyttää, kun tilan ilmanvaihtoa voidaan ohjata tarpeenmukaisesti. Jos tilan henkilömäärä tiedetään ja hiilidioksidipitoisuus mitataan, voidaan näistä arvioida ilmavirran suuruus. Tämä on yksi tapa selvittää, vastaako toteutuva ilmavirta suunniteltua. Ilmanvaihdon suunnittelun ohjearvot (l/s lattianeliölle) on valittu ensisijaisesti tästä näkökulmasta. Nykyään mitoituksen saa tehdä myös mallintamalla (suuret halli- ja liiketilat ym.).

Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtojen mittaustarkkuus on melko huono – etenkin mitattaessa pieniä ilmavirtoja. Tästä syystä yksittäisen huonetilan ilmavirtoja säädettyä toleranssialue on $\pm 20\%$ suunnitellusta ilmavirrasta, sisältäen mittalaitteen ja mittausmenetelmän virheet. Järjestelmä- (iv-kone) tai huoneistokohtaisten ilmavirtojen toleranssialue on $\pm 10\%$ suunnitellusta ilmavirrasta [1] sisältäen mittausvirheet.

Tiiviin ja suurilla mitoitusilmavirroilla varustetun rakennuksen paine-eron säätö halutunlaiseksi saattaa edellyttää ilmavirtojen säätöä alle 1 % tarkkuudella, mihin parhaidenkaan mittausratkaisujen tarkkuus ei riitä.

Koska tähän tarkkuuteen on tällä hetkellä erittäin vaikea päästä, niin ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelussa tulee ottaa aiempaa enemmän huomioon ilmavirtojen hallinta. Tästä syystä tarvitaan uusia ilmanvaihdon suunnitteluohjeita tiiviille rakennuksille, joihin on mahdollista syntyä suuria eroja tulo- ja poistoilmavirtojen välille.

Ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluperiaatetta pitää tältä osin tuoda vastaamaan nykyisten rakennusten asettamia vaatimuksia, jos paine-eroista ja hallitsemattomista ilmavirroista halutaan päästä eroon. Järjestelmät tulee suunnitella siten, ettei ilmavirtojen pienet poikkeamat suunnitelluista arvoista aiheuta haitallisia muutoksia paine-eroihin. Tällä hetkellä ilmavirtojen tasapainolle ei ole asetettu kriteerejä, eikä rakennuksen sisäisiä tai vaipanyli paine-eroja.

Nykyisten mittaustulosten ja järjestelmien ominaisuuksien perusteella rakennuksen vaipan yli +5..-10 Pa paine-eron saavuttaminen koneellisella tulo-poisto järjestelmällä varustetuissa rakennuksissa on mahdollista. Suositettujen mittausten ja tutkimusten perusteella joissain tapauksissa vaaditaan fyysisiä muutoksia järjestelmään, jotta haluttu tai suositeltu paine-taso on saavutettavissa. Uusien rakennusten asetusarvojen ja järjestelmään toteutetun säätöalueen rajoissa painetason pitäisi olla saavutettavissa.

Paine-erolle ei myöskään aiemmin ole ollut selkeää tavoitearvoa eikä mittaamenetelmää. Nykyisin suositellaan käytettäväksi Paine-erojen mittausohjetta, joka löytyy ympäristöministeriön nettisivuilta [3].

3. Ilmanvaihdon suunnitteluohjeiden vaatimuksia

Uusien rakennusten ilmanvaihdon tulee toteuttaa sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta asetuksessa 1009/2017 /1/ esitetyt vaatimukset. Aiemmin rakennetuissa rakennuksissa tulee käyttää aiemmin voimassa olleita rakentamismääräyksiä /2/, kun tarkastellaan valittuja suunnitteluratkaisuja ja ilmanvaihdon toimintaa.

Tiiviiden rakennusten ilmanvaihtoa suunniteltaessa on tärkeää, että seuraavat tavoitteet toteutuisivat:

- ehkäistään ulkovaipan rakenteiden vaurioituminen sisäilman kosteuden vaikutuksesta
- minimoidaan ulkoilman, rakennusmateriaalien ja maaperän (ml. radon) epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan vuotoilmavirtausten mukana
- ehkäistään liian suurten paine-erojen muodostuminen eri huonetilojen välille
- ehkäistään hallitsemattomista ilmavirtauksista aiheutuva vetohaitta ja energianhukka
- ehkäistään liian suurten paine-erojen muodostuminen termisen paine-eron vaikutuksesta
- ylläpidetään oikealaiset ilman virtaussuunnat huonetilojen välillä epäpuhauksien, hajujen ja ylimääräisen kosteuden leviämisen ehkäisemiseksi

Edellä mainittujen tavoitteiden toteuttamiseksi tulisi sekä vakio- että muuttuvilmavirtajärjestelmien suunnitteluohjeisiin tehdä tarkastelut taulukossa 1 ehdotettujen kohtien mukaisesti.

3.1 Vakioilmavirtajärjestelmät

3.1.1 Vakioilmavirtajärjestelmän suunnittelun lähtökohta

Vakioilmavirtajärjestelmien suunnitteluohjeessa tulee määrittellä seuraavat asiat:

- Rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron tavoitetaso sekä sallittu vaihteluväli
- Kenen tehtävä em. paine-eron määrittely on
- Ilmanvaihtosuunnittelun ja ilmanvaihtojärjestelmän säädön peruseriaatteet

Näihin vaikuttavia tekijöitä ovat mm. rakennuksen käyttötarkoitus, kosteuskuormien tai sisäilman kosteuslisän suuruus, rakenneratkaisut, ilmanvaihtojärjestelmä; rakenne, mitoitusilmavirrat. Tavoitetason määrittämisessä tarvitaan yhteistyötä RAK, IV/LVI ja ARK suunnittelijoiden välillä.

3.2 Muuttuvailmavirtajärjestelmät

3.2.1 Muuttuvailmavirtaisen järjestelmän suunnittelun lähtökohta

Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä ilmavirtaa säädetään tarpeen mukaan. Paine-erojen hallinnan kannalta muuttuvailmavirtaisiksi pitää laskea myös järjestelmät, joissa on erikseen säädettäviä kohdepoistoja.

Erittäin tiiviissä rakennuksessa pitää huomioida erillispoistot, joiden ilmavirta on yli 1 % rakennuksen tai vyöhykkeen mitoitusilmavirrasta.

Suunnittelun lähtökohdat:

- Ilmavirtamittauksissa on aina virhettä ja mittausvirheen vuoksi säädetyt ilmavirrat voivat poiketa suunnittelusta. Mittausvirhe vaikuttaa myös automaatiolla säädettyihin ilmavirtoihin.
- Enintään sallitun toleranssialueen (esim. päätelaitekohtaiset ilmavirrat $\pm 20\%$) suuruiset poikkeamat ilmavirroissa eivät saa aiheuttaa liian suuria poikkeamia rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon eivätkä myöskään sisätilojen välisiin paine-eroihin (ml. suunnitellut ilman virtaussuunnat tilojen välillä).

IMS tulo- ja poistokanavassa ei yksinään riitä takaamaan oikealaisia painesuhteita. Muuttuvailmavirtaisen järjestelmän pitää reagoida nopeasti muutoksiin, esimerkiksi vetokaapin luukun avaamiseen, joten paine-erona ei voi käyttää pitkän ajanjakson keskiarvoa.

4. Rakennuksen ilmanvaihdon tuottamien painesuhteiden hallinta

4.1 Huonekohtaisten paine-erojen hallinta vakioilmavirtajärjestelmissä

Huonekohtaisten tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapaino voi muuttaa huonetilan yli- tai alipaineiseksi muuhun rakennukseen nähden. Tästä voi aiheutua hallitsemattomia ilmavirtauksia rakennuksen sisällä. Tila voi myös muuttua liian yli- tai alipaineiseksi ulkoilmaan verrattuna, mikä voi aiheuttaa riskejä sekä sisäilmalle että ulkovaipparakenteiden toiminnalle.

Huonekohtaisten paine-erojen hallintaohjeessa tulee määrittää raja-arvot (toleranssialue) huonekohtaisille paine-eroille silloin, kun tavoitetaso on 0 Pa ts. tilojen välille ei ole suunniteltu paine-eroa.

Raja-arvon ylittävät paine-erot tulee ehkäistä. Ohjeessa tulee määritellä tekniset ratkaisut, jotka voivat perustua mm. hallittuihin vuotoreitteihin; ovirakoon tai siirtoilmalaitteeseen. Paine-eron ylläpito-ohjeessa tulee ohjeistaa tilakohtaisten ilmajvirtojen ja siirtoilmalaitteiden mitoitus silloin, kun tila halutaan pitää jatkuvasti yli- tai alipaineisena muuhun rakennukseen nähden. Tällaisia tiloja ovat mm. pesu- ja WC-tilat.

Mitoitusohjeet tulee laatia siten, että paine-erot pysyvät hallittuina silloinkin, kun tilakohtaisissa ilmajvirroissa on enintään sallitun mittaus- ja säätötarkkuuden suuruisia poikkeamia.

Paine-eron ylläpitoa varten tarvitaan ohjeistus, jota sovelletaan myös niissä tapauksissa, missä halutaan varmistaa l-suuntainen ilmajvirtaus paine-eron suuruutta rajoittavassa siirtoilmareitissä. Tällä hetkellä paine-eron hallinnalle ei ole ohjeistusta.

4.2 Huonekohtaisen paine-eron hallinta muuttuvilmavirtajärjestelmissä

Huonekohtainen paine-eron säätö säätää yksittäisen huonetilan paine-eroa suhteessa muihin saman vyöhykkeen tiloihin, yleensä aulaan tai käytävään verrattuna. Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron hallinnasta vastaa vyöhykekohtainen säätöjärjestelmä.

Muuttuvilmavirtaiset järjestelmät ovat käytössä toimistorakennuksissa, yleisesti niiden neuvotteluhuoneissa, sekä muissa rakennuksissa, joissa käyttäjien määrä saattaa vaihdella paljon. Esimerkiksi luokkahuoneet ja auditoriotilat ovat haastavia hallita paine-erojen osalta. Ilmajvirtsäätimissäkin (IMS) on mittausvirhettä, minkä vuoksi tulo- ja poistoilmavirrat eivät ole täsmälleen yhtä suuret, vaikka molempia säädettäisiin huonekohtaisilla IMS-laitteilla, joiden ilmajvirrat on ohjattu yhtä suuriksi. Vastaava ongelma on myös tiloissa, joissa on tehostuspelleillä varustettuja tulo- ja poistoilmalaitteita – tila voi eri käyttötilanteissa muuttua ali- tai ylipaineiseksi.

5. Tarvittavat uudet ohjeet ilmanvaihdon suunnittelulle paine-erojen hallitsemiseksi

Ilmanvaihdon suunnitteluun paine-erojen hallinnan toteuttamiseksi tulisi sekä vakio- että muuttuvilmavirtajärjestelmien suunnitteluohjeisiin tehdä tarkastelut taulukossa 1 ehdotettujen kohtien mukaisesti. Edellisessä luvussa käsitellyt asiat kuuluvat osana uuteen ohjeistukseen. Myös muiden osa-alueiden ohjeistusta tarvitaan. Karkea jaottelu tarvittavien ohjeiden osalta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ehdotus tarvittavista ohjeista vakio- ja muuttuvilmavirtajärjestelmissä

Vakioilmavirtajärjestelmät	Muuttuvilmavirtajärjestelmät
Vakioilmavirtajärjestelmän suunnittelu	Muuttuvilmavirtaisen järjestelmän suunnittelu
Huonekohtaisten paine-erojen hallinta	Vyöhykejako
Automaatiosuunnittelu	Huonekohtaisen paine-eron hallinta
Muuntojoustavat ratkaisut: rakennusten järjestelmien ja tilaratkaisujen muunneltavuus	

6. Yhteenveto

Rakennusten tiiveyden parantuminen sekä ilmanvaihtojärjestelmien mittauksen epätarkkuus saattavat aiheuttaa rakennuksissa suuria paine-eroja tai hallitsemattomia ilmavirtauksia tilojen välillä tai vaipparakenteen läpi.

Jotta rakennusten paina-erot ovat hallittavissa, niin tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohjeissa tulee käsitellä sekä vakio- että muuttuvilmavirtaisten järjestelmien haasteita sekä etsiä uusia ratkaisuja ilmanvaihdon hallinnan toteuttamiseksi. Painesuhteiden hallinta on huomioitava rakennuksissa, joiden ilmavuotoluku $q_{50} < 2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$.

Tämän artikkelin sisältönä on käytetty Ympäristöministeriölle 2020 laadittua Tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon perusselvitystä. Selvitys tullaan julkaisemaan talotekniikkainfon sivuilla.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Asetuksen voimaantulopäivä 1.1.2018. Ympäristöministeriö 2017.
- [2] Suomen rakentamismääräyskokoelma D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto Määräykset ja ohjeet (1987 – 2012)
- [3] Rakennusten paine-erojen mittausohje, loppuraportti 11.10. 2019, kommenttiversio, <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> (17.1.2021)

Teollisten mineraalikulitujen päästöjen tuotetestaus

Risto Koivusaari, Risto Hiukka ja Mikko Saari
Eurofins Expert Services Oy

Tiivistelmä

Teolliset mineraalikulidut aiheuttavat huoneilmassa sisäilman laadun heikentymistä ja suurina pitoisuuksina hengitysteiden ja ihon ärsytysvaikutuksia. Teollisten mineraalikulitujen lähteinä toimivien tuotteiden kuitupäästöjä voidaan mitata ja analysoida tuotekehityksen tueksi ja puhtausluokitusta varten. Rakennuksissa teolliset mineraalikulidut ovat pääasiassa peräsin mineraalivillaa (lasivilla ja kivivilla) sisältävistä tuotteista. Suuria mineraalikulitupäästöjä voi syntyä testaamattomista ilmanvaihtojärjestelmän tuotteista ja akustiikkatuotteista. Ilmanvaihdon äänenvaimentimet voivat olla mineraalikulitulähteitä, jos vaimennusmateriaalina on käytetty mineraalivillaa. Äänenvaimentimien mineraalikulitupäästöt voidaan mitata laboratorioolosuhteissa ilmanvaihtotuotteiden puhtaustestausohjeen mukaisesti. Mineraalikulitupäästöjen mittausta sisältää kuitujen irtoamisen testaamisen nimellisilmavirralla, täristyskokeessa ja harjapuhdistuksen jälkeen. Mineraalikulitupäästöt kerätään näytesyodattimeen, joka käsitellään kemiallisesti ja mineraalikulidut analysoidaan polarisaatiomikroskoopilla. Huonetilojen sisäpintoihin asennettavien akustiikkatuotteiden mineraalikulitupäästöt voidaan testata samaa menetelmää soveltaen.

1. Johdanto

Mineraalikulitupäästöjen tuotetestausta on tehty 2000-luvun alussa aktiivisesti, mutta viime vuosina testausta on tehty hyvin vähän. Tuotetestaus ja kuitujen ilmanäytteet täydentävät sisäilmamittauksia, joissa tutkitaan lähes yksinomaan pintapölynäytteitä. Tuotetestauksella voidaan varmistua rakentamisessa käytettävien tuotteiden vähäpäästöisyydestä. Olemassa olevissa rakennuksissa menetelmällä voidaan paikantaa kuitulähteitä pintapölynäytteitä varmemmin.

2. Teolliset mineraalikulidut sisäilma- ja terveysongelmana

Teolliset mineraalikulidut aiheuttavat huoneilmassa sisäilman laadun heikentymistä ja suurina pitoisuuksina hengitysteiden ja ihon ärsytysvaikutuksia. Työterveyslaitoksen tutkimuksen [1] mukaan teollisten mineraalikulitujen pysyvistä ja vakavista terveysvaikutuksista ei ole kuitenkaan näyttöä asuin- ja toimistorakennusten sisäilmassa esiintyvillä pitoisuuksilla. Mineraalikulidut voivat kuitenkin aiheuttaa oireilua, joka voi leimata koko rakennuksen sisäilmaongelmaiseksi. Testattujen tuotteiden käyttö uudisrakentamisessa auttaa tehokkaasti mineraalikulitujen päästöjen vähentämisessä.

3. Vaatimukset teollisten mineraalikulitujen pitoisuuksille

Päivitetystä asumisterveysasetuksen [2] soveltamisohjeessa 8/2016 (päivitetty 24.3.2021) [3] annetaan teollisten mineraalikulitujen toimenpiderajaksi kahden viikon pölylaskeumasta määritettynä 0,2 kuitua/cm². Uuden kuitujen määrittämisohjeen mukaan näytteistä lasketaan vain sellaiset teolliset mineraalikulidut, joiden halkaisija on vähintään 3 µm ja pituuden suhde

halkaisijaan on vähintään 3:1. Määrittäjä on oltava $\leq 0,1$ kuitua/cm² ja näytteenottopinta-alan vähintään 14 cm². Ilmanäytteille ohjeessa ei anneta ohjeita tai raja-arvoja.

Ilmanvaihtotuotteiden puhtausluokituksessa on M1-luokan vaatimus tuotteesta irtoavien kuitujen kokonaispitoisuudelle [4] ilmanvaihtotuotteiden puhtaustestausohjeen [5] mukaan testattaessa. Ilmansuodattimille ja äänenvaimentimille kuitujen kokonaispitoisuuden tulee olla testeissä alle 0,1 kuitua/m³. Äänenvaimentimista ei saa puhdistuksen jälkeenkään irrota tätä enempää kuituja. Äänenvaimentimen täristyskokeessa kuitujen kokonaispitoisuuden tulee olla testeissä alle 10 kuitua/m³. Ilmanvaihtotuotteiden testeissä analysoidaan ja lasketaan kuidut, joiden pituus on yli 20 µm. Koska ilmanäytteistä laskettavien kuitujen kokomäärityelmä poikkeaa pintanäytteiden kuitujen määrittäjästä, ei tuloksia voi aina verrata edes suhteellisesti.

4. Teollisten mineraalikuitujen lähteet

4.1 Uudisrakentaminen

Rakennuksissa teolliset mineraalikuidut (jatkoissa kuidut) ovat pääasiassa peräsin mineraalivillaa (lasivilla ja kivivilla) sisältävistä tuotteista. Rakennuksen käyttöönoton jälkeen suurimmat kuitupäästöt voivat syntyä testaamattomista ilmanvaihtojärjestelmän tuotteista ja akustiikkatuotteista. Ilmanvaihtojärjestelmässä merkittävimpiä kuitulähteitä ovat äänenvaimentimet, joissa vaimennusmateriaalina on käytetty mineraalivillaa. Ilmanvaihtojärjestelmän lämmöneristeenä ja paloeristeenä käytettävä mineraalivilla voi toimia kuitulähteenä. Myös ilmanvaihdon suodattimista voi irrota mineraalikuituja (lasikuitu).

4.2 Korjausrakentaminen

Vanhoissa rakennuksissa kuitupäästöt ovat usein peräisin ilmanvaihtojärjestelmässä lämmöneristeenä ja ääneneristeenä käytetystä pinnoittamattomasta mineraalivillasta. Tyypillisesti lähteet ovat ilmanvaihtokoneissa ja -konehuoneissa sekä niihin liittyvissä kammioissa. Aikaisemmin äänenvaimennusta ja ääneneristystä pyrittiin parantamaan käyttämällä kanavistossa ääntä vaimentavia kanavia ja vaimennuslaatikkoja. Tämän vuoksi kuitulähteitä voi olla vanhoissa rakennuksissa muuallakin kuin vain teknisissä tiloissa. Nykyisin ulkoilmaa ei saa ottaa ilman laatua heikentävän rakennusosan kautta, mutta 1970 - 1980-luvuilla ilmaa voitiin ottaa ullakolta. Tällöin yläpohjan eristeistä voi irrota kuituja ja kulkeutua sisälle.

5. Äänenvaimentimien kuitupäästöjen testausmenetelmät

5.1 Koejärjestelyt

Äänenvaimentimien kuitupäästöt voidaan mitata laboratorio-olosuhteissa ilmanvaihtotuotteiden puhtaustestausohjeen mukaisesti [5]. Menetelmä perustuu ilmanvaihtotuotteiden M1-puhtausluokituksen vaatimuksiin. Vastaavaa koemenetelmää voidaan soveltaa myös muille tuotteille kuten akustiikkalevyille ja mineraalivillaeristeille. Koejärjestely perustuu tuotteen läpi tai ohi virtaavaan ilmaan irtoavien kuitujen määrän selvittämiseen.

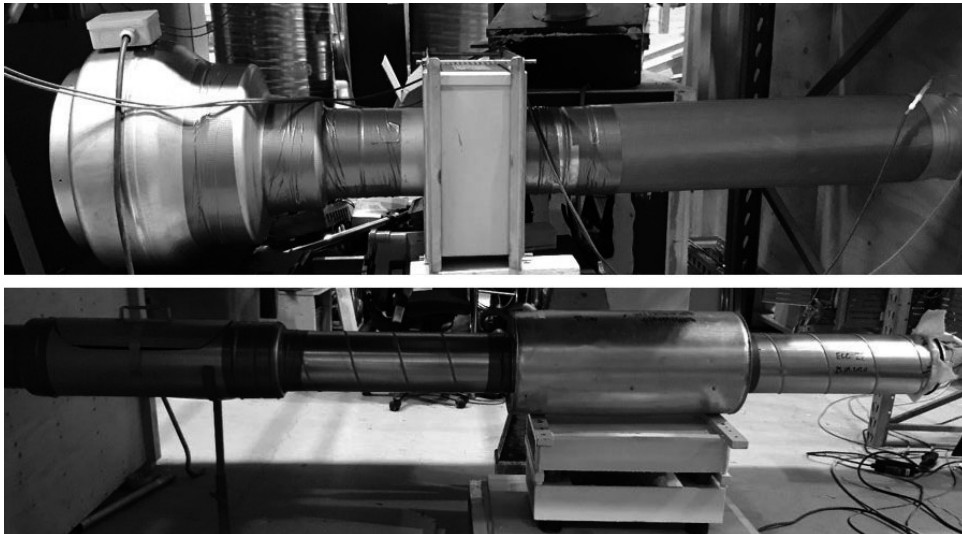
Äänenvaimentimien kuitupäästöjen koelaitteistossa (kuva 1) on oma puhallin säätölaitteineen, ilmavirran mittaussuodattimet ja tehokas HEPA-suodatin, joka puhdistaa laitteistoon tulevan ilman kuituista ja muista epäpuhtauksista. Suurilla äänenvaimentimilla ja ilmavirroilla käytetään tehokkaampaa puhallinta (... 20 m³/s) ja suurempaa kanavistoa sekä HEPA-suodatinta (kuva 2). Testattava laite asennetaan kooltaan laitteeseen sopivaan kanavistoon, jonka loppupäässä on

mineraalikuitujen keräämistä varten polypropeenista valmistettu suodatin. Kanavistossa on puhdistusluukku, jonka kautta äänenvaimenninta voidaan harjata.

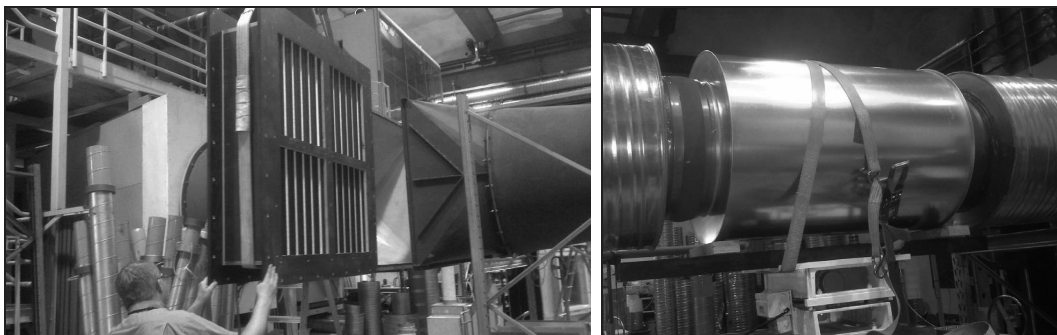
Testattavan tuotteen läpi kulkevan ilmavirran lämpötilan tulee olla 20 – 25 °C ja suhteellisen kosteuden 20 – 65 %.

Äänenvaimentimien kuitupäästöjen mittauksessa tehdään kolme testiä tuotteen valmistajan ilmoittamalla nimellisilmavirralla. Ensimmäisessä testissä mitataan pelkän ilmavirran vaikutus kuitupäästöihin. Testissä 30 minuutin puhdistushuuhTELUN jälkeen mitataan ensimmäinen kuitupäästö yhden tunnin kestäväällä testillä ja toinen 24 tuntia kestäväällä testillä. Toisessa testissä mitataan tärityksen vaikutus kuitupäästöihin. Testattava äänenvaimennin kiinnitetään alustalle, joka aiheuttaa taajuudeltaan 25 – 35 Hz ja amplitudiltaan 0,5 cm värähtelyn. Värähtely vastaa ilmanvaihtokanavistossa esiintyvää värähtelyä. Kuitupäästö mitataan yhden tunnin kestäväällä täritystestillä. Kolmannessa testissä mitataan harjapuhdistuksen vaikutus kuitupäästöihin. Testissä nimellisilmavirralla äänenvaimenninta harjataan sisäpuolelta viiden minuutin ajan pyörivällä harjalla. Tämän jälkeen kuitupäästö mitataan 24 tuntia kestäväällä testillä.

Edellä mainittujen testien lisäksi kuitupäästö voidaan mitata myös paineiskutestissä. Viiden minuutin testin aikana äänenvaimentimeen kohdistetaan noin 100 Pa paineiskuja viiden sekunnin välein. Kuitupäästö mitataan viiden minuutin testin ajalta. Ilmanvaihtojärjestelmät tulisi suunnitella ja niitä tulisi käyttää niin, että merkittäviä paineiskuja ei esiinny. Todellisuudessa puhaltimien käynnistykset, sulkupeltien aukeamiset ja esimerkiksi palopeltien testikäyttö voivat aiheuttaa kanavistoon suuria paineiskuja.



Kuva 1. Pienten äänenvaimentimien kuitupäästöjen testauslaitteisto (ilmavirta enintään 100 dm³/s). Yläkuvassa säädettävä puhallin, HEPA-suodatin ja ilmavirran mittausosa. Alakuvassa testattava äänenvaimennin (kanavaliitännän halkaisija 160 mm) tärityslaitteen päällä ja kanavan päässä kuitujen keräyssuodatin.



Kuva 2. Suurten äänenvaimentimien kuitupäästöjen testauksessa käytetään riittävän suurta HEPA-suodatinta varmistamaan testi-ilman puhtaus myös suurilla ilmavirroilla (... 20 m³/s). Äänenvaimennin on asennettu täristyslaitteen päälle. Kuitupäästöjen lisäksi samalla koearjestyksellä voidaan mitata myös äänenvaimennusominaisuudet.

5.2 Näytteiden keräysmenetelmät

Testattava äänenvaimennin asennetaan kooltaan laitteeseen sopivaan kanavistoon, jonka loppupäässä on mineraalikuitujen keräämistä varten polypropeenista valmistettu suodatin (kuva 3). Polypropeenisuodattimen on todettu menetelmän kehittämissä vaiheissa tehdyissä testeissä keräävän kaikki ilmavirrassa olevat kuidut [5]. Kuitupäästötestin jälkeen keräyssuodatin irrotetaan varovasti, jotta siitä ei irtoa kuituja ympäristöön. Keräyssuodattimen keskeltä leikataan edustava näytepala, joka laitetaan suojapussiin analysointia varten. Näytepala on yleensä kooltaan 10 x 10 cm tai halkaisijaltaan 37 mm. Suurista keräyssuodattimista voidaan ottaa useampia näytepaloja mittausten luotettavuuden parantamiseksi.



Kuva 3. Testeissä kuitunäytteet kerätään polypropeenikankaasta tehtyihin keräyssuodattimiin. Pienissä äänenvaimentimissa keräyssuodattimen koko vastaa yleensä äänenvaimentimen kanavaliitäntää. Suurilla äänenvaimentimilla keräyssuodatin rakennetaan 600 x 600 mm moduulikehyksiä yhdistämällä. Tällöin ilmavirrat voivat olla useita kuutioita sekunnissa.

5.3 Näytteiden käsittely

Kuitukeräykseen käytetystä suodattimesta leikataan pala, jonka pinta-ala tunnetaan esimerkiksi 30 cm². Näytepalasta huuhdotaan kerätyt kuidut vedellä sopivaan lasiastiaan. Näyte suodatetaan selluloosaesterisuodattimelle. Suodatin kuivataan ja tehdään läpinäkyväksi triasetiinilla. [6]

5.4 Näytteiden analysointi

Kuidut analysoidaan polarisaatiomikroskoopilla. Läpinäkyvästä suodattimesta lasketaan kokovaatimukset täyttävien teollisten mineraalikuitujen lukumäärä.

5.5 Kuitupitoisuuden laskenta

Ilmavirrassa olevien kuitujen lukumääräpitoisuus lasketaan keräyssuodattimesta määritetyn kuitupitoisuuden (kuitujen lukumäärä suodattimen pinta-alaa kohti) perusteella yhtälöllä 1 [5].

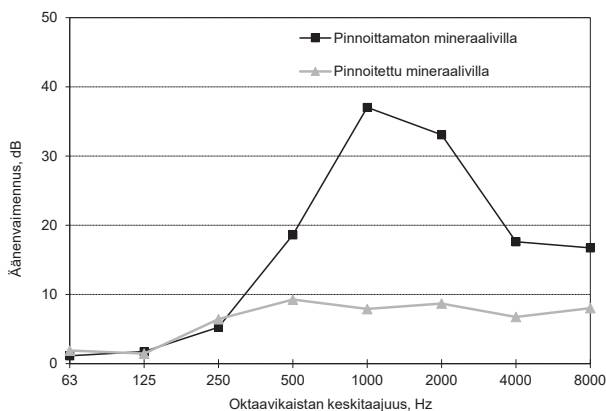
$$C_V = \frac{C_A \cdot A}{q_V \cdot T} \quad (1)$$

missä C_V = kuitujen lukumääräpitoisuus ilmavirrassa (kuitua/m³)
 C_A = kuitujen lukumäärä näytteeksi leikatun polypropeenisuodattimen pinta-alayksikköä kohti (kuitua/m²)
 A = keräyksessä käytetyn polypropeenisuodattimen poikkipinta-ala, m²
 q_V = ilman tilavuusvirta kanavassa (m³/s)
 T = mittausaika (s)

6. Esimerkkejä äänenvaimentimien kuitupäästöjen testauksesta

6.1 Mineraalivillan pinnoittamisen vaikutus äänenvaimennukseen

Äänenvaimennukseen käytettävän mineraalivillan kuitupäästöjä voidaan pienentää erilaisilla pinnoitteilla. Kuvassa 4 esitetään erään pinnoitusratkaisun vaikutus mineraalivillan äänenvaimennuskykyyn. Tässä tapauksessa kuitupäästöt saatiin kuriin, mutta äänenvaimennuskyky menetettiin.



Kuva 4. Erään pinnoitusratkaisun vaikutus mineraalivillan äänenvaimennuskykyyn.

6.2 Virtausnopeuden vaikutus mineraalikuitupäästöön

Normaalisti äänenvaimentimien mineraalikuitupäästöt mitataan nimellisilmavirralla, jolla virtausnopeus on tyypillisesti 2 – 5 m/s. Taulukossa 1 esitetään ilman virtausnopeuden vaikutus

erään äänenvaimentimen mineraalikuitupäästöihin suurilla virtausnopeuksilla. Virtausnopeuden kolminkertaistaminen lisäsi mineraalikuitupäästön lähes nelinkertaiseksi.

Taulukko 1. Ilman virtausnopeuden vaikutus erään äänenvaimentimen mineraalikuitupäästöihin suurilla virtausnopeuksilla.

Ilman virtausnopeus kanavassa	Mineraalikuitupäästö ilmaan
15 m/s	0,6 kuitua/m ³ i
45 m/s	2,3 kuitua/m ³

7. Yhteenveto

Teolliset mineraalikuidut heikentävät sisäilman laatua. Ilmanvaihtojärjestelmässä merkittävimpiä kuitulähteitä ovat äänenvaimentimet, joissa vaimennusmateriaalina on käytetty mineraalivillaa. Ilmanvaihtotuotteiden puhtausluokituksessa (M1) äänenvaimentimien kuitupäästöille tuloilmaan on esitetty vaatimuksia. Äänenvaimentimien kuitupäästöt voidaan mitata laboratorio-olosuhteissa ilmanvaihtotuotteiden puhtaustestausohjeen mukaisesti. Ilmanvaihtojärjestelmän kuitupäästöjen testauksessa voidaan puhtausluokituksen lisäksi testata erilaisten pinnoitusaineiden ja pinnoitusmateriaalien vaikutusta kuitupäästöön. Äänenvaimentimien osalta tulee myös selvittää pinnoitusten vaikutus äänenvaimennuskykyyn. Ilmavirtaan irtoavien kuitujen testausta voitaisiin laajentaa koskemaan myös esimerkiksi akustiikkalevyjä, joita koskeva rakennusmateriaalien M1-puhtausluokitus ei tällä hetkellä sisällä lainkaan vaatimuksia kuitupäästöille.

Lähdeluettelo

- [1] Tuomi, T., Wallenius, K., Mahiout, S., Rautiala, S. ja Lappalainen, S. 2020. Teolliset mineraalikuidut toimistotyypissä työtiloissa. Esiintyminen, altistumisen arviointi, terveysvaikutukset ja päästöjen hallinta. Helsinki, Työterveyslaitos. 56 s.
- [2] Asumisterveysasetus 545/2015. 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.
- [3] Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. 2021. Osa III. Asumisterveysasetus § 14-19. Ohje 8/2016, päivitetty 24.3.2021. Helsinki, Valvira. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto. 12 s.
- [4] Sisäilmastoluokitus 2018. 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT 07-11297. Helsinki, Rakennustietosäätiö RTS ry. 24 s.
- [5] Björkroth, M., Kukkonen, E., Seppänen, O., Tuomainen, M., Asikainen, V. ja Kovanen, K. 2012. Ilmanvaihtotuotteiden puhtaustestausohje, versio 3.0. Helsinki, Rakennustietosäätiö RTS. 43 s.
- [6] Kovanen, K., Heimonen, I., Laamanen, J., Riala, R., Harju, R., Tuovila, H., Kämppi, R., Säntti, J., Tuomi, T., Salo, S.-P., Voutilainen, R. ja Tossavainen, A. 2006. Ilmanvaihtolaitteiden hiukkaspäästöt. Altistuminen, mittaaminen ja tuotetestaus. Espoo, VTT Tiedotteita 2360. 57 s. + liitt. 6 s.

Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset

ABRESTO

KALSIUMSILIKAATTILEVYT KOKEMUKSELLA

» **Kokenut toimija**

Kalsiumsilikaattilevyjen toimittaja jo vuodesta 1985

» **Luotettavat materiaali-
valmistajat**

» **Hyvä saatavuus**

Toimitukset varastostamme Helsingin Herttoniemestä tai suuremmissa erissä suoraan tehtaalta

*Lue lisää osoitteessa
www.abresto.fi*

**Aidot
kapillaarisesti
aktiiviset ja
diffuusioavoimet
kalsiumsilikaatti-
levyt sisäpuoliseen
eristämiseen!**

Oy Abresto Ab - Puusepänkatu 11 FI-00880 Helsinki
info@abresto.fi - www.abresto.fi



Terveellisiä
ja viihtyisiä tiloja.
Me autamme.

 **A-INSINÖÖRIT**

Ihmisiä, joiden kanssa rakennat rohkeasti parempaa

ains.fi

**Pasilan Tripla-kokonaisuus:
asemarakennus, hotelli, Business Park, kauppakeskus ja asuintalot**

Akukonin osuus kattoi

- meluselvitykset
- tärinän ja runkomelun torjunnan (liikenne ja kuntosalit)
- akustiikkasuunnittelun kauppakeskuksessa, asunnoissa, elokuvateatterissa, työ- ja esitystiloissa
- esitystilojen toiminnalliset periaatteet

Kuva: YIT



MITÄ KUULUU?

Akukonin asiakkaille kuuluu hyvää, sillä tehtävämme on luoda akustisesti toimivia tiloja sekä suojella asiakkaitamme ja kaikkia tilojen käyttäjiä ympäristömelulta ja tärinältä. Näin edistämme viihtyvyyttä, turvallisuutta, toimivuutta ja työtehoa. Akustiikan, melun- torjunnan ja AV-suunnittelun asiantuntijana olemme vahvistaneet elämyksiä ja luoneet hyvinvointia elämän koko kirjolla jo yli 25 vuotta.

Ota yhteyttä! Olemme kuulolla, kun haluat varmistaa, että rakennushankkeesi täyttää niin viranomaisten kuin tulevien käyttäjien toiveet ja vaatimukset.



AKUKON
SOUND – VISION – VIBRATION

akukon.fi | info@akukon.com | 010 3200 700



Hallittu betonin päällystäminen!

Kaikki ARDEX-höyrynsulkutuotteet toimivat betonin **alkalisuojana**,
lisäämättä rakenteen kosteutta.

ARDEX-höyrynsulkutuotteella
**varmistat rakenteen toimivuuden
ja sisäilman laadun**
...ja tasoitetta käytät tasoittamiseen.

	ARDEX P 40 MS	ARDEX EP 1400	ARDEX EP 2000	ARDEX EP 2001 W
Alkalisuoja	✓	✓	✓	✓
Kapillaarikosteuden hallinta			✓	✓
Rakennekosteuden hallinta 95 % RH		✓	✓	✓
Rakennekosteuden hallinta 95 % RH (ei lattialämmitystä)	✓	✓	✓	✓
Rakennekosteuden hallinta 85 % RH	✓	✓	✓	✓
Haitta-aineiden hallinta		✓	✓	✓

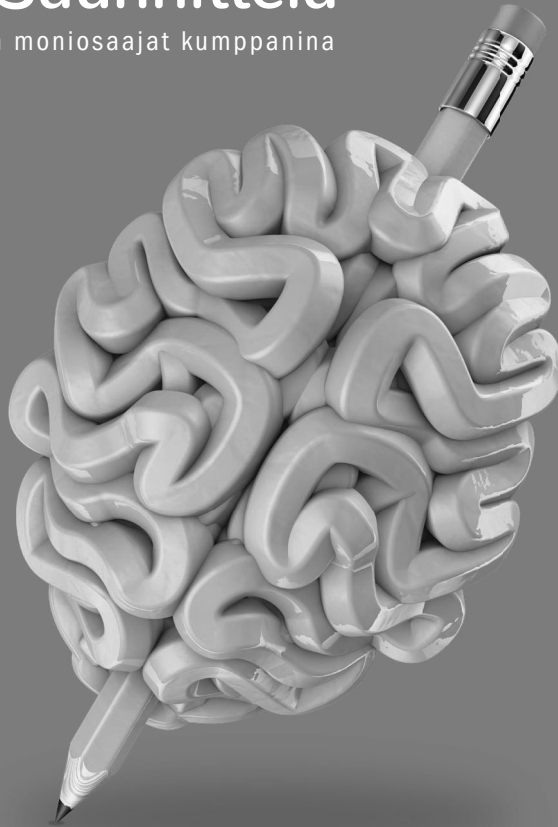
Tutustu höyrynsulkutuotteisiin www.ardex.fi





AX-Suunnittelu

Tekniikan moniosaajat kumppanina



TAVALLISTA TERÄVÄMPI INSINÖÖRITOIMISTO

AX-Suunnittelu tarjoaa monialaista erikoisosaamista ja luovaa ongelmanratkaisukykyä vaativimpiinkin projekteihisi. Saat meiltä energiatehokkaat, kestävät ja turvalliset talotekniikan ratkaisut teollisuuteen ja palvelurakennuksiin.

Suunnittelu-, tutkimus- ja selvityshankkeidemme ydintä ovat myös ympäristötekniikka, energialaitokset, maakaasu- ja kaukolämpöverkostot, prosessisuunnittelu, lämpöpumpputekniikka, mittauspalvelut ja puhdistilat.



COMPOSITES & POLYURETHANES

BANG & BONSUMER

Markkinoiden parhaimmat eristeet niin lämmön kuin vedeneristykseen.

Eristä tehokkaasti ja tiiviisti ruiskutettavalla polyuretaanilla!

Ekospray tarjoaa markkinoiden korkeatasoisimman lämmön ja kosteuden eristyksen. Yhdellä ammattilaisen asennuskerralla vaivattomasti luotettava, 100% tiivis ja saumaton rakenne esimerkiksi julkisivuun.

Markkinoiden tehokkainta lämmöneristämistä umpisoluisella polyuretaanilla:

- Täysin tiivis eristekerros
- Toimii höyrünsulkuna. Jo 35mm paksuudella saavutetaan tarvittava vesihöyrynvastus.
- Uusi neljännen sukupolven HFO ponneaine!
- Lämmönjohtavuus 0,024W/mK, kun paksuus min 120mm.
- Suojaa kosteudelta ja homeelta
- Ei heikennä matkapuhelin liikennettä
- Ympäristöystävällinen tuote
- M1 päästoluokitus
- CE hyväksytty

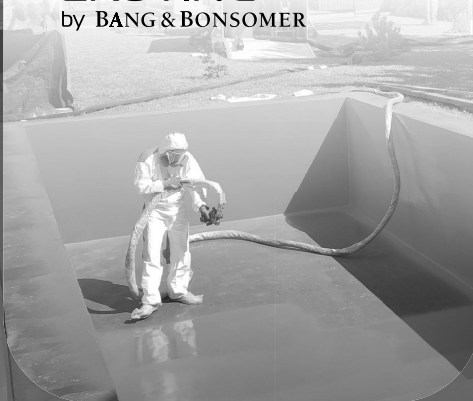
EKOSPRAY®

by BANG & BONSUMER



EKOTING®

by BANG & BONSUMER



Vedeneristys tämän päivän vaatimuksien mukaan ruiskutettavalla polyurealla.

Ekoting tuoteperheen tuotteista löytyy ratkaisu niin katoille, kuin teollisuuden pinnoituksiin ja vedeneristykseen. Kestävä ja äärimmäisen elastinen polyurea takaa 100% tiiviin ja saumattoman vedeneristyksen.

Edistynyttä pinnoittamista Polyurealla:

- Täysin tiivis ja saumaton.
- Kovettuminen tapahtuu jo 10 sekunnissa ja 2-3mm vahvuinen pinnoite kestää kävelyn jo minuutin kuluttua.
- Katoille suoraan vanhan katteen päälle. Sopii erityisen hyvin suurille pinta-aloille, joissa vanha bitumikate (markkinoiden paras joustavuus)
- Paloluokitus bitumi-, tili-, pelti- ja mineralitekatteille BroofT2, sekä Ekospray polyuretaanieristeen päälle
- Paloluokka E (EN 11925-2)
- Murtovenymä aina 330%:sta jopa 1900% asti, joka on markkinoiden paras (DIN53504)
- Säilyttää ominaisuutensa jopa +120C asteessa
- Ei sisällä liuottimia tai haittuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC-vapaa)
- Vesihöyryn läpäisevyys 1000µ
- CE hyväksytty
- Saatavana myös käsilevitteinen vaihtoehto!



BANG & BONSUMER
DELIVERING SMART MATERIAL TECHNOLOGIES

bangbonsomer.com



bauroc

KAIKKEEN RAKENTAMISEEN

Karkaistu kevytbetoni on palamaton, eristävä, kevyt, kestävä ja monikäyttöinen rakennusmateriaali, josta valmistetut rakenteet ovat yksinkertaisia ja toimivia.

Bauroc on Pohjois-Euroopan suurin karkaistujen kevytbetonituotteiden valmistaja. Baurocin tuotevalikoimaan kuuluvat harkot, väliseinälaatat, raudoitettut seinä- ja taselementit sekä palkit. Tuotteita käytetään uudis- ja korjausrakentamisessa ja niistä rakennetaan niin Jämerä Kivitalot, koulut, päiväkodit, liikerakennukset kuin teollisuushallitkin.

www.bauroc.fi

Kaikki katoista



BMI on markkinoiden laajin kattojen ja vedeneristeiden valmistaja. Tuotteisiimme ja osaamiseemme on luotettu omakotitalon katoilta aina vaativiin viherkansirakenteisiin. Suunnittelun tueksi tarjoamme laajan valikoiman ilmaisia BIM- ja CAD-suunnittelumateriaaleja ProdLib-kirjastosta. Katso myös asennusvideomme BMI Icopalin ja Ormaxin Youtube-kanavalta.

Ota yhteyttä, autamme vedeneristyksen suunnittelussa,

Markus Kalaoja

Tekninen päällikkö
+358 44 333 8920
markus.kalaoja@bmigroup.com

BMI icopal

BMI ORMAX

bmigroup.com/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**

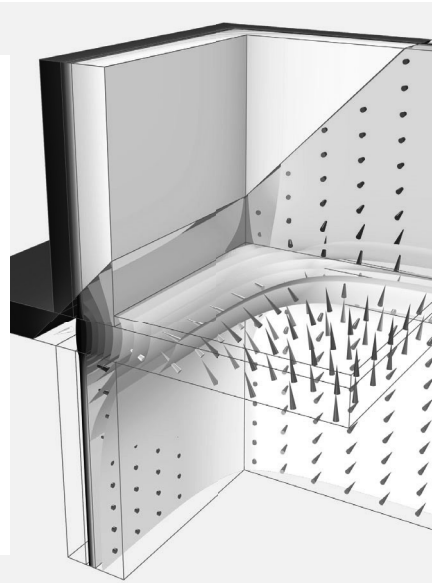
Expect more

 CNES

Predict Thermal Performance in Buildings with Simulation

The construction of sustainable and energy-efficient buildings calls for innovative architectural designs and the use of new structural components. To predict and optimize the thermal performance of new constructions, engineers need realistic and reliable computer models that take into account all of the physics at play, such as heat transfer, moisture transport, and structural mechanics. This is where multiphysics simulation comes in.

[comsol.com/offers/application-note-thermal-management-buildings](https://www.comsol.com/offers/application-note-thermal-management-buildings)



The COMSOL Multiphysics® software is used for simulating designs, devices, and processes in all fields of engineering, manufacturing, and scientific research.

 COMSOL

CONSTI



KOKONAISVALTAISET BETONIJULKISIVUJEN JA PARVEKERAKENTEIDEN KORJAUKSET JA HUOLTOKÄSITTELYT

- ▼ Pesut, impregnoinnit ja huoltomaalaukset
- ▼ Raskaat betoninkorjaukset
- ▼ Parvekelattioiden pinnoitukset
- ▼ Saumausten uusimiset
- ▼ Tiili-laattojen ja klinkkerien vaihtotyöt
- ▼ Väri- ja valkobetoni-pintojen erikoispaikkaukset

Lähempänä asiakasta

WWW.CONSTI.FI



luotettava
kumppani

RALA
SERTIFIKAATTI

RALA
PÄTEVYYS

dimenson
GROUP

ehta^{eriste}

Kasvanut, kehitetty ja
valmistettu Suomessa
Ehta Insulation
Made in Finland



100%
puuta.



kemikaaliton täyspuueriste



mineraalivillan tasoinen lämmöneristysarvo (0,0429 W/mK)



hyvä kosteuskestävyys, imee ja luovuttaa kosteuden



oikea ekoteko, hiilijalanjälki omassa luokassa: -1.6 CO²kg/kg



asennetaan puhaltamalla, itse tai puhallusurakoitsija



eriste ala- ylä- ja välipohjiin, sekä ulko- ja väliseiniin



mineraalivilloja parempi ääneneristävyys, tiheys 60-80 kg/m³



www.ehtatalot.fi

Eriman

RUISKUTETTAVAT POLYURETAANIVAAHDOT

RT-KORTTI 103261

1) UMPISOLUINEN PU-VAAHTO

- Saumaton, tiivis ja hyvin lämpöä eristävä, toimii myös höyrysulkuna
- Käyttökohteet: ylä- ja alapohjat, seinät, säiliöt, kanavat, jne.
- E-paloluokka, CE-merkintä
- M1-rakennusmateriaalien päästoluokitus
- Lämmönjohtavuus:

$$\lambda_D = d_{N \geq 60 \text{ mm}} = 0.026/0.027 \text{ W/Mk,}$$

$$d_{N \geq 120 \text{ mm}} = 0.024 \text{ W/mk}$$

2) AVOSOLUINEN PU-VAAHTO

- Hengittävä kevytvahto
- Sopii hyvin esim. omakotitalon eristämiseen: seinät, katot, lattiat
- E-paloluokka, CE-merkintä
- Lämmönjohtavuus:

$$\lambda_D = 0.038 \text{ W/mK}$$

Myynti ja urakointi:

Eriman Oy/ Ilkka Mansala

puh. 0400 451 145

ilkka.mansala@eriman.fi



- PUVAHDOT

FF

FINNIFOAM®

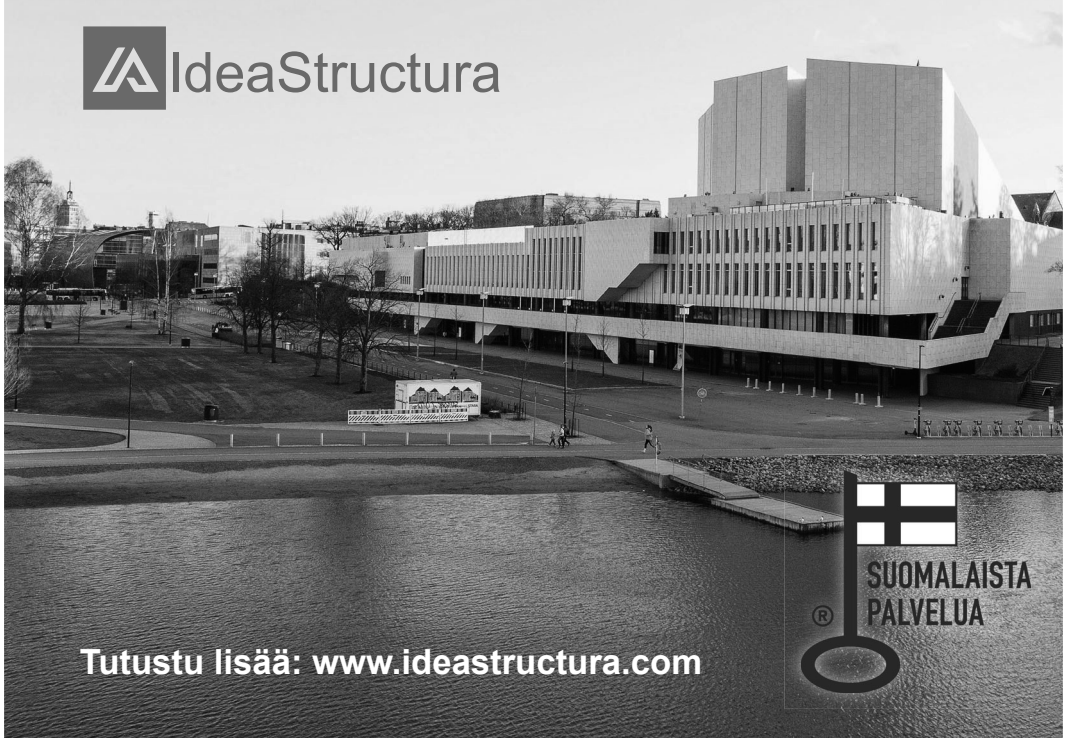


HUNTON

Luonnosta. Luonnolle.

Kotimaista rakentamisen asiantuntijapalvelua

Olemme suomalainen rakennusalan suunnittelutoimisto, joka palvelee asiakkaita niin pienissä kuin suurissakin hankkeissa. Asiakkaitamme ovat kiinteistöalan ammattilaiset ja taloyhtiöt. Liikevaihtomme oli vuonna 2020 noin 8,4 miljoonaa euroa. Yli 90 asiantuntijaa palvelee Helsingissä, Kokkolassa, Hämeenlinnassa, Kuopiossa ja Savonlinnassa. Palvelumme kattavat monipuolisesti asunto-, teollisuus-, toimitila-, liikunta-, opetus- ja hoivarakennusten suunnittelun. Suunnittelemme teräs-, betoni- ja puurakenteita. Palveluihimme kuuluvat rakennesuunnittelu, rakennusfysikaalinen suunnittelu, sisäilmapalvelut, kuntotutkimukset ja valvonta.



Tutustu lisää: www.ideastructura.com



INDOOR AIR QUALITY ECOSYSTEM

TAMLINK
BUSINESS
FINLAND

Avoin yhteistyöalusta kokonaisvaltaisesti terveeseen sisäilman saavuttamiseksi

RAKENNUKSEN OMISTAJAT JA OPEROIJAT

- Kokonaisvaltaiset ratkaisut
- Korkeatasoinen osaaminen
- Yhteistarjoama
- IAQ as a Service
- Ekosysteemin verkostot
- Hankintamenettelyt

PALVELUNTARJOAJAT JA TEKNOLOGIAYRITYKSET

- R&D&I-projektit
- Co-creation
- Verkostoituminen
- Yhteistarjoama
- Yhteismarkkinointi
- Kansainväliset verkostot

KANSAINVÄLINEN VERKOSTO

- Suomalainen osaaminen
- Yhteistarjoama
- Projektit
- Co-creation
- IAQ:n laaja verkosto
- Tapahtumat

www.IAQe.fi

Ota yhteyttä
ja liity mukaan
ekosysteemiin!

YRITYKSET, JOTKA OVAT JO LIITTYNEET PARTNEREIKSEMME:



IAQe | Indoor Air Quality ecosystem | www.IAQe.fi | +358 40 513 6917



MEHTO

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy

INSINÖÖRITOIMISTO
sulin

MONIPUOLISET RATKAISUT
**RAKENTEIDEN
TIIVIYTEEN**

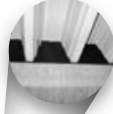
40
YEARS
PRODUCTION

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-CONNECT
VARIO SD



ISO-MEMBRA SX



ISO-BLOCO ONE



Jaatimet 



KATUSE PROFID



Triflex

Delivering solutions together.



PITKÄAIKAINEN
SUOJAUS
KOSTEUTTA VASTAAN:
PARVEKELLE
VESIKATTOILLE
PYSÄKÖINTITALOIHIN

Triflexin edut:

- Pienistään yksityiskohdista tulee vedenpitäviä
- Koveutuu nopeasti - täysin valmis n. 45 minuuttissa
- Asennus jopa -5 ° C: n lämpötilassa
- Kestävä ja kattaa dynaamiset halkeamat
- Eurooppalainen CE -merkintä

www.triflex.com

www.katuseprofid.ee





Savunhallinnan luotettava ammattilainen

SAVUNPOISTON TARKOITUS

Tulipalon sattuessa savunpoiston tarkoituksena on muodostaa lattian yläpuolelle savuton kerros, jotta:

- ihmiset pääsevät poistumaan ja
- palokunnan toiminta helpottuu

Painovoimainen savunhallintajärjestelmä koostuu viidestä pääkomponentista rakennusurakassa (ru):

1. savunpoistoluukut
2. korvausilmaluukut
3. savusulut
4. tehonlähteet
5. ohjauskeskukset

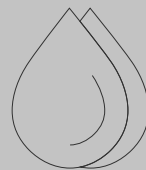
Näiden lisäksi savunhallintajärjestelmän toimivuuden kannalta olennaista on oikein suunniteltu ja toteutettu kaapelointi, joka kuuluu sähköurakkaan (su).

www.keravent.fi



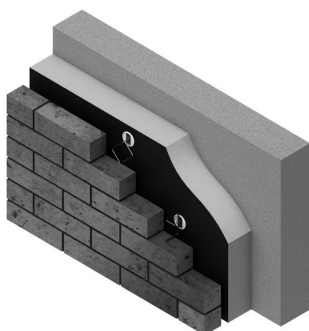
Energiatehokkaat ja turvalliset lämmöneristeet

The facts matter.



Kingspan®

Kingspan Kooltherm® -julkisivueristeillä toteutetaan energiatehokas ja lämmityskuluissa säästöjä tuova seinärakenne.



Kooltherm® K15 ja K15 C Julkisivueristeet

- Soveltuvat käytettäväksi P1-paloluokan tuulettuvissa julkisivuissa.

Kooltherm® K20 betonielementtieroite

- Betonielementtiteollisuuden tuote
- Nopea ja helppo asentaa



Skannaa QR-koodi saadaksesi lisätietoja

Puh.: 0207 786 700 Email: info@kingspaneristeet.fi

#MoistureControlMatters

KNAUF



**Kipsimassalla tasainen
ja toimiva lattia
vaativimpiinkin kohteisiin**

Kipsi on turvallinen ja kustannustehokas valinta



Knaufin pumpattavat ja itsestään tasoittuvat kipsisideaineiset lattiamassat ovat matala-alkalisia eivätkä ne reagoi mattoliimojen kanssa. Tuotteilla on M1-sisäilmaluokitus.

Kipsilattia on tasalämpöinen ja energiatehokas. Se johtaa jopa 40 % paremmin lämpöä kuin sementtitasotelattia. Hyvän taivutuslujuuden ja pienen kutistuman ansiosta verkkoa tai raudoitusta ei tarvita pintalatioissa. Valmis lattia on päällystettävissä kaikilla yleisesti käytössä olevilla pintamateriaaleilla, kuten parketti, laminaatti, laatat, muovimatto ja epoksinnoite.

www.knauf.fi

MATOlóg®



TUTUSTU MYÖS
MUIHIN
KOULUTUKSIIN
METROPOLIA.FI/
RAKENNUSALA

Hanki rakennusalan pätevyydet Suomen suurimmalta AMK:lta!

Kosteusvaurion kuntotutkija, KVKT, 32 op

Saat pätevyyden toimia kosteusvaurion kuntotutkijana ja tarkastajana. Koulutuksen jälkeen voit hakea FISE-pätevyyttä. →

Hinta: **11 900€ + alv 24%**

Ilmoittaudu
viimeistään **11.1.2022**
Kesto: **25.1.2022 - 9.2.2023**

Rakennusterveysasiantuntija, RTA, 47 op

Saat käyttöösi ajantasaisen rakennusterveysasiantuntijan sertifiikaatin, ja olet sisäilma-asioihin ja terveelliseen sisäympäristöön koulutautunut erityisasiantuntija. Koulutuksella on Eurofins Expert Services Oy:n hyväksyntä. →

Hinta: **13 900€ + alv 24%**

Ilmoittaudu
viimeistään **11.1.2022**
Kesto: **25.1.2022 - 15.2.2023**

Sisäilma-asiantuntija, SISA, 28 op

Saavutat henkilösertifioidun sisäilmatutkimuksen tuloksista vastaavan asiantuntijan pätevyyden. Koulutuksella on Eurofins Expert Services Oy:n hyväksyntä. →

Hinta: **10 600€ + alv 24%**

Ilmoittaudu
viimeistään **11.1.2022**
Kesto: **25.1.2022 - 9.2.2023**

Ota yhteyttä - räätälöimme yrityksesi tarpeisiin sopivat koulutuskokonaisuudet

Anni Sarantila,

Täydennyskoulutus ja yrityspalvelut

+358 45 876 1078

Anni.Sarantila@metropolia.fi



yrityspalvelut@metropolia.fi
Lue lisää: [metropolia.fi/rakennusala](https://www.metropolia.fi/rakennusala)

 **Metropolia**



**SMARTER
LEARNING
SPACES**

Tuotteet

Mittalaitteet kiinteistönhoidon ja rakennusalan ammattilaisille



DL-P2 Paine-erologgeri

Paine-erologgeri asbestipurkutyömaille ja kiinteistöjen paineistuksen tarkistamiseen.



DLS Langaton mittausjärjestelmä

Langaton loggerijärjestelmä kiinteistöjen, varastojen ja työmaiden seurantaan.

Valikoimiimme kuuluu mm. ilmanvaihdon, kosteuden, lämpötilan, paineen, äänitasojen sekä pH:n ja erilaisten pitoisuuksien mittaukseen soveltuvia laitteita ja välineitä. Tunnetuimmat myymiemme mittalaitteiden toimintaperiaatteet, niiden todelliset suoritusarvot sekä vahvuudet ja heikkoudet todellisissa mittausolosuhteissa.

Miran-tuotteet on suunniteltu ja valmistettu Suomessa.



DP-200 Paine-eromittari

Paine-eromittari kiinteistöjen ja ilmanvaihtojärjestelmien tarkistusmittauksiin.

Kuuluuko?

PihlaPRO Antennilasi

Tutkitusti toimiva ratkaisu sisätilojen kuuluvuusongelmiin.



KUULUU KAIKKIALLA

Antennilasi siirtää mobiilisignaalin keilamaisesti sisälle ja jakaa sen laajasti koko huoneeseen, jolloin kuuluvuus on hyvä koko tilassa.



HUOMAAMATON

Antenni on hiuksen hieno kuvio lasissa, jota on vaikea erottaa paljaalla silmällä. Pystysuora kuvio peittää vain pienen osan lasipinnasta.



TUTKITUSTI TOIMIVA

3G, 4G ja 5G-verkossa tehdyissä kenttäkokeissa mobiiliverkon toimivuus on noussut täysin uudelle tasolle operaattorista riippumatta.



YHTEISTYÖSSÄ:

STEALTHCASE

PihlaPRO valmistaa hinta-laatusuhteiltaan parhaita kotimaisia ikkunoita ja ovia ainoastaan rakennusliikkeiden ja alan ammattilaisten käyttöön.

Ota yhteyttä ja pyydä tarjous: **0800 550 880** | www.pihlapro.fi

ÆRIA

Koulutettujen ammattilaisten oma media

Rakennusalalla tapahtuu koko ajan. Jos todella haluat tietää, miten rakennettu ympäristö muodostuu nyt ja tulevaisuudessa, tee kuten 50 000 Rakennuslehden lukijaa. Ryhdy tiedonsaajaksi.

**Rakennuslehti,
siellä missä sinäkin!**

rakennuslehti.fi

sanoma
tekniikkajulkaisut





Rakennustarkastusyhdistys RTY ry.



VAHVISTA OSAAMISTASI

Rakennusterveyden ja korjausrakentamisen koulutuksissa syvennät osaamistasi terveellisestä, turvallisesta ja kestävästä rakentamisesta. RATEKOn koulutusten sisältökokonaisuudet ovat työelämälähtöisiä ja helposti käytäntöön sovellettavissa.

Rakennusterveysasiantuntija RTA
Sisäilma-asiantuntija SISA
Kosteusvaurion kuntotutkija KVKT
Kosteusvaurion korjaussuunnittelija KVKS
Kosteusvaurion korjaustyönjohtaja KVKTJ
Kosteudenhallintakoordinaattori
Korjausopintojen osakokonaisuus RATKO

RATEKOn rakennusterveyskoulutuksissa voit hyödyntää vanhat opintosi, sillä koulutuksen laajuus määräytyy opiskelijan aiemmin hankkiman osaamisen perusteella. Sinulla on myös mahdollisuus suorittaa useampi koulutus kerralla. Valitse omasi ja tule mukaan!

**Ota yhteyttä, katsotaan miten
voit hyödyntää osaamistasi
uusissa opinnoissa.**
www.rateko.fi



RATEKO

RAKLI

Tilaa elämälle

U-ARVON MITTAUKSELLA TERVEELLISTÄ JA TALOUDELLISTA KORJAUSRAKENTAMISTA

Nopea U-arvon mittausmenetelmä mahdollistaa rakennuksen eristyksen suorituskyvyn tarkan määrittämisen taloudellisesti. Jo yhden tunnin aikana salkullisella laitteita voidaan saada 5-10 mittausta kerrallaan!

TODELLISISTA U-ARVOISTA ON HYÖTYÄ ESIMERKIKSI

- laadittaessa rakennukselle energiakatselmusta ja -todistusta
- korjausrakentamisen sekä jälkiasennustyön suunnittelussa
- rakentamisen sekä materiaalien laadunvalvonnassa
- vanhojen, historiallisesti merkittävien, rakenteiden tutkimuksissa
- kosteusvaurioituneiden rakenteiden havaitsemisessa



OLE YHTEYDESSÄ!

Antti Hatsala

p. 030 670 5623

antti.hatsala@rakersystems.fi

► Tutustu ja lue lisää www.rakersystems.fi



Ramboll on johtava kestävien kaupunkien ja yhteiskuntien suunnittelu- ja konsultointiyritys. Säätiöomisteisessa yhtiössämme työskentelee 16 000 asiantuntijaa globaalisti. Suomessa toimimme maanlaajuisesti 2 500 asiantuntijan voimin. Palvelujamme ovat innovatiiviset ja kestävät ratkaisut kaupunkien, infrastruktuurin, liikenteen, ympäristön ja rakennusten suunnittelussa, rakennuttamisessa, rakentamisessa ja ylläpidossa.

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

AINUTLAATUISIA RAKENNUKSIA. HUOMISPÄIVÄN OTTEELLA.

Kuntotutkimukset, korjaussuunnittelu ja koordinoitupalvelut kokeneelta toimijalta. Yhdessä luomme olemassa olevalle kiinteistölle parhaan ja kestäväen ratkaisun.

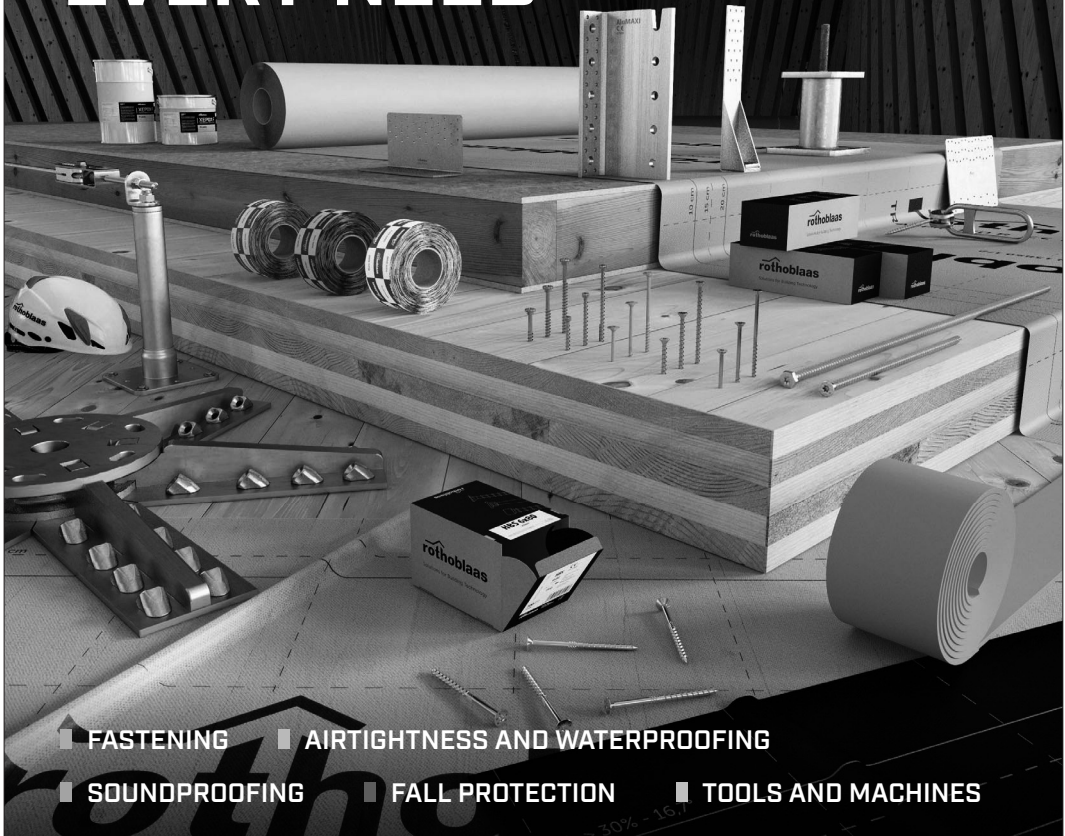
fi.ramboll.com



RESTART

RAKENNUSRESTAURINTI

SOLUTIONS THAT SUIT EVERY NEED



- FASTENING
- AIRTIGHTNESS AND WATERPROOFING
- SOUNDPROOFING
- FALL PROTECTION
- TOOLS AND MACHINES

Rothoblaas is the multinational Italian company that has made innovative technology its mission, making its way to the forefront for timber buildings and construction safety in just a few years. Thanks to its comprehensive product range and the technically-prepared and widespread sales network, the company promotes the transfer of its know-how to the customers and aims to be a prominent and reliable partner for developing and innovating products and building methods. All of this contributes to a new culture of sustainable construction, focused on increasing comfortable living and reducing CO₂ emissions.

www.rothoblaas.com



Jesse Luukkonen
Lounais-Suomi | Keski-Suomi | Länsi-Suomi | Pohjois-Suomi
+358 45 342 4165 | jesse.luukkonen@rothoblaas.com

rothoblaas

Solutions for Building Technology

30
YEARS
ANNIVERSARY

Pauli Paintola
Kaakkois-Suomi | Itä-Suomi | Päijät-Häme | Uusimaa
+358 40 65 744 42 | pauli.paintola@rothoblaas.com

S A F A

SAFE **Drying**

**Rakennukset
ikuisesti kuiviksi**

**Kun perinteiset
keinot eivät riitä**

www.safedrying.fi

Autamme rakentamaan erinomaista elinympäristöä ja parantamaan elämänlaatua yhdistämällä mukavuuden ja vastuullisuuden.




SAINT-GOBAIN

celsicom
easyconnect

**Edistyksellinen etämittaus
ei ole koskaan ollut
yksinkertaisempaa.**

celsicom-easyconnect.com



Sensorcell Oy

Celsicom Easy Connect

-Maahantuoja ja edustaja Suomessa-

09-4282 7940

info@sensorcell.fi

Sisäilmayhdistyksen tapahtumia

SISÄILMAPAJA12

LAHDEN SIBELIUSTALO | 30.11.–1.12.2021



NÄHDÄÄN LAHDESSA, HYVÄSSÄ HAPESSA!



15.3.2022
SISÄILMASTO
SEMINAARI



SISÄILMAYHDISTYS

sisailmayhdistys.fi/tapahtumat

Tilaa Sisäilmautiset-uutiskirje:
www.sisailmautiset.fi

SITOWISE

SWECO RAKENNUSFYSIIKAN PALVELUT

Rakennusfysiikan osaamisemme varmistaa toimivat ja pitkäaikaiskestävät rakenteet sekä terveellisen sisäilmaston. Palvelumme kattavat koko rakentamisen ketjun sekä kiinteistön ylläpidon, ympäri Suomen.

Ydinosaamistamme on:

- Rakennusfysikaalinen suunnittelu
- Rakennusten sisäilma- ja kosteustekniset tutkimukset ja työmaan laadunvarmistuspalvelut
- Ulkovaipparakenteiden korjaustarveselvitykset ja korjaussuunnittelu
- Rakenteiden toiminnan arviointi rakennusfysikaalisen mallinnuksen avulla (FEM, CFD)
- Tuotekehitys hyödyntäen laaja-alaista kokemusta sekä rakennusfysikaalista mallinnusta
- Kosteudenhallintakoordinaattorin tehtävät
- Suunnittelijan erikoisvalvonta työmaalla
- 3. osapuolen rakennusfysikaaliset suunnitelmatarkastukset
- Asiantuntijalausunnot

WWW.SWECO.FI

SWECO 

**TAMPEREEN
TILAPALVELUT**



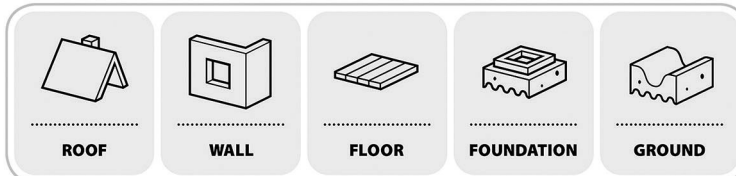


www.tectis.net

We've
got you

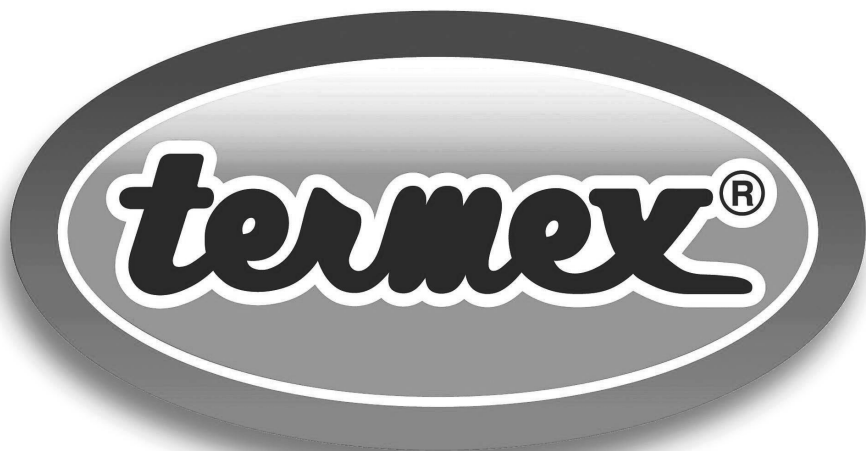
COVERED

CONSTRUCTION MEMBRANES, PAPERS & ACCESSORIES



*Suomalaista perheyrittäjyyttä
vuodesta 1985.*

ARVO **sitko** **ANTI CON RANKA** **ADAPTIVE** **Tyvek®**



Selluvilla

Terveet tilat 2028

on hallituksen 10-vuotinen toimintaohjelma, jonka tavoitteena on tervehdyttää julkiset rakennukset ja tehostaa sisäilmasta oireilevien hoitoa ja kuntoutusta.

Tilaa Terveet tilat -uutiskirje verkkosivujemme kautta ja pysy kärryillä ohjelman etenemisestä!

tilatjaterveys.fi

- Ohjelma
- Tilaa uutiskirje

**Seuraa meitä Twitterissä:
@TerveetTilat**

TERVEET
TILAT 2028

TIIVISTALO

TIIVISTYSJÄRJESTELMÄT RAKENTAMISEEN

KAFLEX / ROFLEX
LÄPIVIENTIKÄULUKSET



INTELLO[®]XN
HÖYRYSULKUKANKAAT



TESCON[®]
Vana / No 1 / POWER
YLEISTIIVISTYSTEIPIT



TESCON[®]
PROTECT
KULMATIIVISTYSTEIPIT



CONTEGA[®]SOLIDOEXO **CONTEGA[®]EXO**
ULKOPUOLISET LIITOSNAUHAT



SOLITEX MENTO[®]
ALUSKATTEET



CONTEGA[®]SOLIDOISI **CONTEGA[®]SI**
SISÄPUOLISET LIITOSNAUHAT



SOLITEX FRONTA[®]
TUULENSUOJAKANKAAT



ORCON[®]F / MULTIBOND
TIIVISTYSLIIMAT JA -NAUHAT



AEROSANA
VISCONN / VISCONN FIBRE
TIIVISTYSPINNOITTEET



TESCON[®]
PRIMER[®] / SPRIMER
POHJUSTUSAINEET



TESCON[®]INVIS
TUULENSUOJATEIPPI



Nyt myös
äänieristysratkaisut!

www.tiivistalo.fi



Timberfinder

Passion for optimized building solutions



Soveltavaa rakennusfysiikkaa vuosikymmenten kokemuksella

Tarjoamme asiantuntijapalveluita mm. Ilmanvaihtoteknisiin ja kosteusvaurioituneiden rakenteiden kuntotutkimuksiin sekä rakennusfysikaaliseen suunnitteluun, mallinnukseen ja suunnitelmatarkastukseen.

Käytettävissänne ovat vuosikymmenten kokemuksen ja tarvittavien pätevyyksien omaavat asiantuntijat!

Ota yhteyttä:

Virpi Sandström

Tiimipäällikkö

Vahanan Rakennusfysiikka Oy

040 486 7790

virpi.sandstrom@vahanen.com

www.vahanen.com

VAHANEN

Rakennetaan onnistumisia

NÄIN KOULUN
KATTORAKENTEISTA
POISTETTIIN
**KYMMENIÄ
LITROJA
KOSTEUTTA**

ÄLYKATTO POISTAA KOSTEUDEN FIKSUSTI

Kruunupyyn kunnassa Pohjanmaalla sijaitsevan koulun kuntoa ei tarkkailla satunnaisesti, vaan kattorakenteita seuraa VILPE Sense -järjestelmä. Sense ei tydy pelkkään tarkkailuun, vaan se myös tehostaa rakenteiden tuuletusta automaattisesti ja tarpeen mukaan. Yhden kuukauden aikana kattorakenteista poistettiin kymmeniä litroja kosteutta.

Sense-järjestelmän hyödyt

- Ylä- ja alapohjan kunnan järjestelmällinen seuranta
- Rakenteet kuivuvat paremmin
- Ehkäisee home- tai sienikasvuston muodostumista
- Vähemmän yllättäviä remontteja

Yhteistyössä:



VILPE[®]
Sense

> VILPE.COM/FI/SENSE

Mikä on VILPE Sense ja miten se toimii?

VILPE Sense -järjestelmä poistaa kosteutta ylä- tai ala-pohjan rakenteista tarpeen mukaan ja ehkäisee kosteusvaurioita. Katolle asennetut anturit havaitsevat, kun kosteustaso nousee. Tämä informaatio välittyy langattomasti huippumuriin, jonka toiminta tehostuu. Kun rakenteet ovat kuivuneet, huippumurin toiminta palautuu normaaliksi. Rakenteiden kuntoa seuraamalla mahdolliset vauriot havaitaan nopeasti. Sense-järjestelmän voi asentaa katon alipainetuulettiin, joten rakenteet säilyvät ehjinä.

Kahdeksankertainen ero entiseen

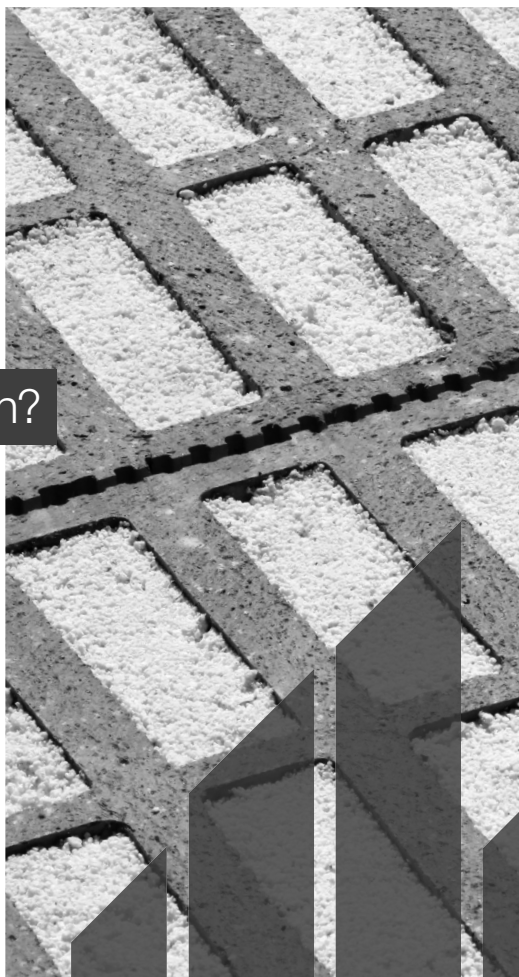
Koulurakennus Kruunupyssä oli niin sanottu ongelmaton kohde, eli siellä ei tiedetty olevan kosteusvaurioita eikä Sensekään havainnut niitä. Siitä huolimatta kesäkuussa 2021 Sense poisti yli 40 litraa kosteutta – kahdeksan kertaa enemmän kuin alipainetuuletus.

Näin suuri kosteusmäärä ei johdu piilevistä kattovuodoista tai -vaurioista, vaan Sensen tehokkuudesta. Sense poistaa kosteutta vain silloin, kun olosuhteet ovat sopivat (sää on kuiva). Alipainetuuletuksessa ilmavirta taas on jatkuva: ilma kiertää rakenteissa tasaisesti, satoi tai paistoi. Tarpeenmukainen kosteudenpoisto sen sijaan huolehtii, että esimerkiksi sadesäällä ilmavirta minimoidaan. Näin rakenteisiin ei viedä tarpeettomasti kosteaa ilmaa.

Keväällä 2020 asennettu Sense-järjestelmä on osoittanut tehokkuutensa. Joka kuukausi Sense on poistanut enemmän kosteutta kuin alipaineinen ilmankierto. Tulokset on laskettu keskimääräisellä paine-erolla.



Kiinnostaako massiivitiilirakentaminen?



Poroton U8 ja S8 P -kennoharkot massiivitiilirakentamiseen.

Yksiaineinen, massiivinen tiili tekee uutta tuloaan runkorakentamiseen. Ilmaeristeinen tai vaihtoehtoisesti vulkaanisella perliittirouheella täytetty Poroton-kennoharkko on ratkaisu niin pientalojen, asuinkerrostalojen kuin julkisten rakennusten kuten koulujen ja päiväkotien runkorakentamiseen.

Rakennusfysikaalisesti optimaalinen ja sisäilmaesteetön kennoharkkorakenne on investointi kestävään ja turvalliseen tulevaisuuteen.

www.wienerberger.fi


Wienerberger

WIISTE

YKSINKERTAISESTI ÄLYKÄSTÄ KOSTEUDENHALLINTAA

Kosteudenseurannan älyratkaisujen markkinajohtaja Suomessa.
Asiakkainamme on yli 130 rakennusliikettä ja lähes 2000 kohdetta.

ASIAKKAAT
SANOVAT:

“**Ei paluuta vanhaan
toimintamalliin**”

Asiakkaitamme:

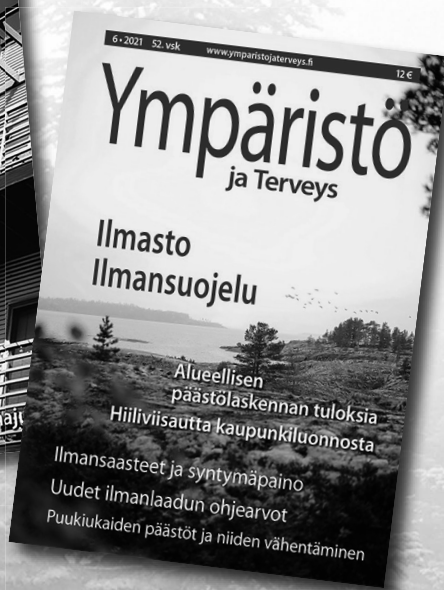
YIT

renta



weber
SAINT-GOBAIN

BONAVA



Ympäristö ja Terveys-lehti

ympäristöalan sitoutumaton ammattilehti

Ilmestyy 8 numeroa vuodessa

HINNAT 2021:

Painettu lehti: kestopilaus 70 €, vuositilaus 75 €, irtonumero 12 €

Näköislehti: 58 €

Painettu lehti + näköislehti: kestopilaus 90 €, vuositilaus 95 €

Tilaukset verkkosivujemme kautta.

www.ymparistojahterveys.fi

puhtaamman huomisen ääni

