



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
*Rakennustekniikan laitos*



## **RAKENNUSFYSIKKA 2009**

**Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut  
27.–29.10.2009, Tampere**

Toimittajat Juha Vinha & Kimmo Lähdesmäki

Tampereen teknillinen yliopisto  
Rakennustekniikan laitos  
Rakennetekniikka  
Tampere 2009

ISBN 978-952-15-2254-3

## Esipuhe

Valtakunnallinen rakennusfysiikkaseminaari järjestetään nyt toisen kerran. Seminaarin ohjelmaa laajennettiin tällä kertaa kolmelle päivälle seminaariesityksien suuren määrän vuoksi. Myös osanottajien määrä on edelleen kasvanut, mikä kertoo aihealueen kiinnostavuudesta ja seminaarin tarpeellisuudesta. On ollut ilahduttavaa huomata, että tapahtuma on saanut näin hyvän vastaanoton rakennusalan ammattilaisten keskuudessa.

Kiristyvät energiansäästöavoitteet ja lämmöneristysmääräykset näkyvät tällä kertaa seminaarissa vielä aiempaa enemmän. Viimeinen päivä seminaarissa liittyykin kokonaan tähän aihealueeseen sisältäen esityksiä sekä rakennusten ilmanpitävyydestä että hyvin eristetyistä matalaenergia- ja passiivitaloista. Energiansäästön ohella esityksissä tarkastellaan myös lisäeristämisen vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, joka on ollut ajankohtainen aihe viime aikojen julkisessa keskustelussa.

Myös seminaarin kansainväliset pääpuhujat on valittu tähän samaan teemaan liittyen. Tohtori Berit Time pitää esityksen Norjassa toteutetuista ja parhaillaan käynnissä olevista hankkeista liittyen rakenteiden kosteustekniseen toimintaan ja energiankulutuksen vähentämiseen. Norjassa tähän aihealueeseen panostetaan tällä hetkellä erittäin voimakkaasti. Professori Carl-Eric Hagentoft kertoo puolestaan niistä riskeistä ja ongelmista, joita voi esiintyä, kun vaipparakenteiden U-arvoja parannetaan. Professori Hagentoft on myös parhaillaan valmistelemassa uutta kansainvälistä International Energy Agency (IEA) alaisuudessa toimivaa Annex tutkimusohjelmaa tähän aihepiiriin liittyen.

Lämmöneristyksen ja ilmanpitävyyden lisäksi seminaarissa on kuitenkin paljon muitakin mielenkiintoisia aihealueita. Esimerkiksi homeen kasvun laskennalliseen mallinnukseen liittynyt laaja tutkimusprojekti on juuri saatu päätökseen ja sen tuloksia esitellään useammassakin esityksessä. Tällä kertaa mukana on myös esityksiä ikkunoiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta. Kosteusvauriot ja julkisivurakenteiden toiminta edustavat puolestaan perinteisiä seminaarin aihepiirejä.

Kiitän kaikkia artikkelien kirjoittajia ja esittäjiä, seminaaripäivien puheenjohtajia ja seminaarin järjestelyyn osallistuneita ihmisiä sekä seminaarin järjestämistä tukeneita yrityksiä ja yhdistyksiä merkittävästä panoksesta seminaarin toteuttamisessa.

Tampereella 14.10.2009

Juha Vinha  
TTY, Rakennustekniikan laitos  
Seminaarin puheenjohtaja  
RIL:n rakennusfysiikan toimikunnan puheenjohtaja

## Rakennusfysiikka 2009 –seminaarin tukijat

Seuraavat yritykset ja yhdistykset ovat tukeneet Rakennusfysiikka 2009 –seminaarin järjestämistä:

A-Insinöörit Oy  
Christian Berner Oy  
Comsol Oy  
Elmatec Oy  
Eltete Oy  
EPS-rakennuseristeteollisuus  
Fibratus Oy  
Finnfoam Oy  
H+H Finland Oy  
Hedtec Oy  
Icopal Oy  
Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy  
Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen Oy  
Inwido Finland Oy  
Jaatimet Oy  
Jetta-Talo Oy  
Knauf Oy  
Lemminkäinen Katto Oy  
maxit Oy Ab  
Metsäteollisuus ry  
Muottikolmio Oy  
NCC  
Parma Oy  
Paroc Oy Ab  
As Rake  
Rakennusteollisuuden Koulutuskeskus RATEKO  
Rautaruukki Oyj  
Redi-talot Oy  
Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy  
Senaatti-kiinteistöt  
Skaala Ikkunat ja Ovet Oy  
Skanska  
Suomen Rakennustarkastus Oy  
Suomen Sisäilmakeskus Oy  
Suunnittelutoimisto Dimensio Oy  
ThermiSol Oy  
Tremco illbruck Oy  
Turun Juva Oy  
Uponor Oyj  
Vahanan-yhtiöt  
Wienerberger Oy

**SISÄLLYSLUETTELO**

<b>Esipuhe</b>	iii
<b>Rakennusfysiikka 2009 –seminaarin tukijat</b>	iv
<b>1. Avaussessio</b>	1
Adaption of buildings to a changing climate in Norway – resent and future research work <i>Berit Time, Kim Robert Lisø, Stig Geving, Steinar Grynning, Jonas Holme, Bjørn Petter Jelle, Knut Noreng, Sivert Uvsløkk, Jan Vincent Thue, Tore Kvande and Thor-Oskar Relander</i>	3
Risk of performance failure in new and retrofitted low-energy building envelopes <i>Carl-Eric Hagentoft</i>	23
<b>2. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus</b>	33
Rakennusfysikaalinen suunnittelu vaativassa kerrostalokohteessa <i>Toni Tuomola</i>	35
Maanvastaisten rakenteiden salaojittava lämmöneristäminen <i>Mikko Aalto ja Osmo Semberg</i>	43
Kosteusteknisesti turvallinen kellarinseinän lämmöneristys ja vedenpaine-eristys uudella Finnfoam CW-300 eristeellä <i>Henri Nieminen</i>	49
<b>3. Rakenteiden kosteusvauriot ja korjaaminen</b>	53
Kosteusvaurioiden yleisyys Euroopassa <i>Ulla Haverinen-Shaughnessy</i>	55
Säälle alttiiden puurakenteiden kestoajan mallintaminen <i>Hannu Viitanen, Tomi Toratti, Ruut Peuhkuri, Tuomo Ojanen ja Lasse Makkonen</i>	61
Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen <i>Susanna Peltola ja Vesa Asikainen</i>	69
Seurakunnallisten rakennusten kiinteistönpidollisia ja korjausteknisiä haasteita <i>Ville Varjo</i>	77
Huokoisten laastien sekä polyamidi-kalvon VOC-yhdisteiden läpäisevyys <i>Janne Sievola ja Hanna Keinänen</i>	83
Kostuneen rakenteen kuivatus mikroaaltokuivaimella <i>Ilkka Tikkanen ja Virpi Ranta</i>	93
Kartanon viljamakasiini - korjataanko vai rakennetaanko uudestaan? <i>Anu Laurila</i>	103
Kokemuksia kuntotutkimuksiin liittyvien mittaustulosten tulkinnasta: yleiset virheet ja sudenkuopat <i>Jommi Suonketo</i>	109

<b>4. Julkisivurakenteet</b>	<b>115</b>
Pakkasenkestävyydeltään puutteellisten betonijulkisivujen korjausmahdollisuudet <i>Jukka Lahdensivu</i>	117
Raketerm-julkisivuelementin rakennusfysikaalinen toiminta <i>Kimmo Lähdesmäki ja Juha Vinha</i>	127
Puurakenteinen TES-järjestelmä julkisivujen korjausratkaisuna <i>Erno Huttunen ja Markus Derry</i>	137
Uusi energiatehokas julkisivujen saneerausmenetelmä <i>Jussi Kurikka, Pasi Käkelä ja Janne Jormalainen</i>	147
<b>5. Ikkunat</b>	<b>157</b>
Ikkunoiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät ja ikkunat sisäilman olosuhteiden indikaattorina <i>Timo Kauppinen, Ismo Heimonen, Kari Hemmilä ja Markku Riihimäki</i>	159
Ikkunoiden toiminnalliset vaatimukset ja niiden toteuttamisen keinot – kuinka toteutetaan hyvä lämmöneristävyys ja ilman- ja sateenpitävyys? <i>Ismo Heimonen, Kari Hemmilä ja Pekka Sipari</i>	171
Hyvin eristetyn ikkunan kondensoitumisherkyys kenttätutkimuksessa <i>Kimmo Lähdesmäki ja Juha Vinha</i>	183
<b>6. Homeen kasvu rakennuksissa</b>	<b>193</b>
Käytännön esimerkkejä rakennusten kontaminoitumisesta ja niiden puhdistamisesta <i>Pertti Metiäinen</i>	195
Välipohjarakenteiden vanhojen täyttöjen vaikutukset sisäilmassa <i>Harri Korkalainen</i>	199
Homeen estäminen rakennuksissa – kosteudenhallinnan menettelytavat suunnittelusta käytäntöön <i>Ensio Laaksonen</i>	207
<b>7. Homeen kasvun laskennallinen mallinnus</b>	<b>217</b>
Rakennusmateriaalien homehtuminen laboratorio- ja kenttäkokeissa <i>Kati Salminen, Hannu Viitanen, Leena Paajanen, Kimmo Lähdesmäki, Tomi Strander, Juha Vinha, Hanna Iitti, Tuomo Ojanen ja Ruut Peuhkuri</i>	219
Homeen kasvu seinärakenteissa laboratorio- ja kenttäkokeissa <i>Kimmo Lähdesmäki, Kati Salminen, Juha Vinha, Tomi Strander, Hannu Viitanen, Leena Paajanen, Hanna Iitti, Tuomo Ojanen ja Ruut Peuhkuri</i>	229

Rakennusmateriaalien homeenkestävyys ja sen mallintaminen pysyvissä kosteusrasitusoloissa <i>Ruut Peuhkuri, Hannu Viitanen, Tuomo Ojanen, Juha Vinha ja Kimmo Lähdesmäki</i>	239
Homeen kasvun mallintaminen vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa <i>Tuomo Ojanen, Ruut Peuhkuri, Hannu Viitanen, Juha Vinha ja Kimmo Lähdesmäki</i>	249
<b>8. Ääneneristys</b>	<b>259</b>
Suurten asuintilojen ääneneristys <i>Heikki Helimäki ja Timo Huhtala</i>	261
Rakennusosien ilmajääneneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä <i>Mikko Kylliäinen ja Antti Mikkilä</i>	269
Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ilmajääneneristävyys <i>Jussi Rauhala</i>	279
Raideliikenteen tärinä ja runkomelu; arviointi- ja vaimennusmenetelmät viimeaikaisissa kohteissa <i>Timo Huhtala</i>	289
<b>9. Rakennusfysiikan opetus</b>	<b>299</b>
Uuden rakennusfysiikan käsikirjan toteutus <i>Juha Vinha</i>	301
<b>10. Rakennusten ilmanpitävyys</b>	<b>309</b>
Rakennusten ilmanpitävyys ja energiatehokkuus <i>Timo Kauppinen, Ilpo Kouhia, Keijo Kovanen, Tuomo Ojanen, Jarmo Laamanen, Tapani Mäkiö, Pekka Seppälä ja Erkki Vähäsöyrinki</i>	311
Kerrostalon ilmanpitävyyden määrittäminen koko portaana mittauksena <i>Anu Aaltonen ja Juha Vinha</i>	321
Calculating Potential Freedom from Structural Damage of Thermal Insulation Structure in Timber-Built Systems <i>Jens-Lüder Herms</i>	331
Ilmavuotojen merkitys seinä- ja kattorakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa <i>Targo Kalamees ja Jarek Kurnitski</i>	341
Ohjeita ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutukseen <i>Hanna Aho ja Juha Vinha</i>	351
Ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje teollisille talotoimittajille <i>Juha Vinha, Jarek Kurnitski, Minna Korpi ja Jussi Mattila</i>	361

<b>11. Energian tuotto ja käyttö</b>	<b>371</b>
Aurinkopaneleista aurinkoteknisen toiminnallisuuden sisältäviin rakennusosiin <i>Mikko Juntunen</i>	373
Energiatehokas ja kosteusteknisesti turvallinen kuivanapitolämmitys kesämökeissä <i>Jarkko Piironen ja Juha Vinha</i>	381
<b>12. Matalaenergia- ja passiivitalot</b>	<b>391</b>
Pientalojen matalaenergiatalokonsepteja <i>Timo Kalema ja Jari Rintamäki</i>	393
Raahen Kummatti – pura ja rakenna projekti 1970-luvun lähiössä <i>Harri Hagan ja Petri Kontukoski</i>	403
Yläpohjaratkaisu matala- ja passiivienergiataloihin <i>Janne Jormalainen</i>	415
Paroc – passiivitaloprojekti <i>Pekka Haikonen</i>	421
Korjaamalla passiivitalostandardiin <i>Ruut Peuhkuri ja Søren Pedersen</i>	427
Passiivitalosuunnittelijoiden koulutus ja sertifiointi <i>Ruut Peuhkuri, Søren Pedersen, Ingrid Weiss ja Annette Bähr</i>	437
Case Luukku House: Tavoitteena plusenergiatalo Madridissa ja nollaenergiatalo Helsingissä <i>Petri Pyly, Kimmo Lylykangas ja Matias Keto</i>	445
<b>13. Matalaenergiarakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta</b>	<b>453</b>
Rakennusprosessien kosteuden hallinta ja matalaenergiarakenteiden toimivuus <i>Ruut Peuhkuri, Tuomo Ojanen ja Jyri Nieminen</i>	455
Lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia rakenteiden käytännön toteutukseen <i>Jukka Lahdensivu</i>	465
Kosteusteknisesti turvallinen matalaenergia- ja passiivirakentaminen <i>Pasi Käkelä ja Janne Jormalainen</i>	475
Ilmastonmuutoksen vaikutukset matalaenergiarakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa – uusi FRAME-projekti <i>Juha Vinha ja Ari Venäläinen</i>	485
<b>14. Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset</b>	<b>493</b>



## **1. Avaussessio**



## **Adaption of buildings to a changing climate in Norway – resent and future research work**

Berit Time<sup>1</sup>, Kim Robert Lisø<sup>1</sup>, Stig Geving<sup>1</sup>, Steinar Grynning<sup>1</sup>, Jonas Holme<sup>1</sup>, Bjørn Petter Jelle<sup>1</sup>, Knut Noreng<sup>1</sup>, Sivert Uvsløkk<sup>1</sup>, Jan Vincent Thue<sup>2</sup>, Tore Kvande<sup>2</sup> and Thor-Oskar Relander<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SINTEF Building and Infrastructure

<sup>2</sup> Norwegian University of Science and Technology (NTNU)

### **Abstract**

Some extreme weather events and an increasing focus on global warming and climate change at the end of last century was the background for the initiative of the establishment of the resent research on climate adaption of buildings which started with the large program *Climate 2000 (2000 – 2007)*, at that time Norway's largest ongoing research & development programme in the construction industry. Large following up projects are running now, *CAB – Climate adaption of Buildings (2007 – 2009)* and *ROBUST - Robust envelope construction details for buildings of the 21. century (2008 – 2010)*. The focus on global warming and the emission of greenhouse gases has increased even more the last couple of years. Both worldwide and in Europe buildings account for about 40% of all primary energy use and therefore contribute to significant greenhouse gas emissions. A combination of making buildings more energy-efficient and use a larger fraction of renewable energy is therefore a key issue to meet the global challenges related to climate change and resource shortages. This is the background for the establishment of the latest research centre *ZEB - Zero Emission Building (2009-2016)*. An effort involving 20 partners in the building sector with a budget of 40 million Euros. The main objective of ZEB is to develop competitive products and solutions for existing and new buildings that will lead to market penetration of buildings that have zero emissions of greenhouse gases related to their production, operation and demolition. The Centre will encompass both residential and commercial buildings, as well as public buildings.

This paper presents results and some outputs from some focus areas within the past and ongoing projects and some main field of research for the newly established research centre on Zero Emission Building.

### **1. Background on climate adapted low-energy building envelope technologies**

#### **1.1 Climate adaption of buildings a main focus area of research**

The historical development of Norwegian building traditions implies both an adaptation towards different preconditions for use of buildings and varying styles of architecture, but also an adjustment towards the extreme climatic variations in Norway. Changes in building practice also reflect the economic development and new demands in standard of living. The extremely varied climate and topography in Norway puts great demands on the design and localization of buildings and the correct choice of materials and constructions. The interpretation of why damage caused by impacts from climatic loads have arised, and how such damage can be reduced, is crucial to the design and function of buildings and structures in cold climates. Climatic factors such as rainfall and snowfall, wind loads, air temperature and exposure to the sun cause serious

damage to buildings and structures each year. Moreover, it would appear that there is worse yet to come. Observations increasingly point to global warming and other changes in the climate system. The trend for the last 20 – 30 years, with milder and wetter autumns and winters and more storms along the coast of Norway, is expected to increase over the next few decades. Climate change will entail new conditions for building and construction work in Norway. Future building structures will probably have to cope with even more severe climatic loads. The built environment has an expected lifetime of 60 to over 100 years per building. Potential implications of climatic change on buildings to be constructed over the next few decades must be studied today. Knowledge about the potential effects of climate change on the built environment, and how we best could adapt to these changes, together with knowledge about weather protection in the construction process, will be of utmost importance for the construction industry in the years to come.

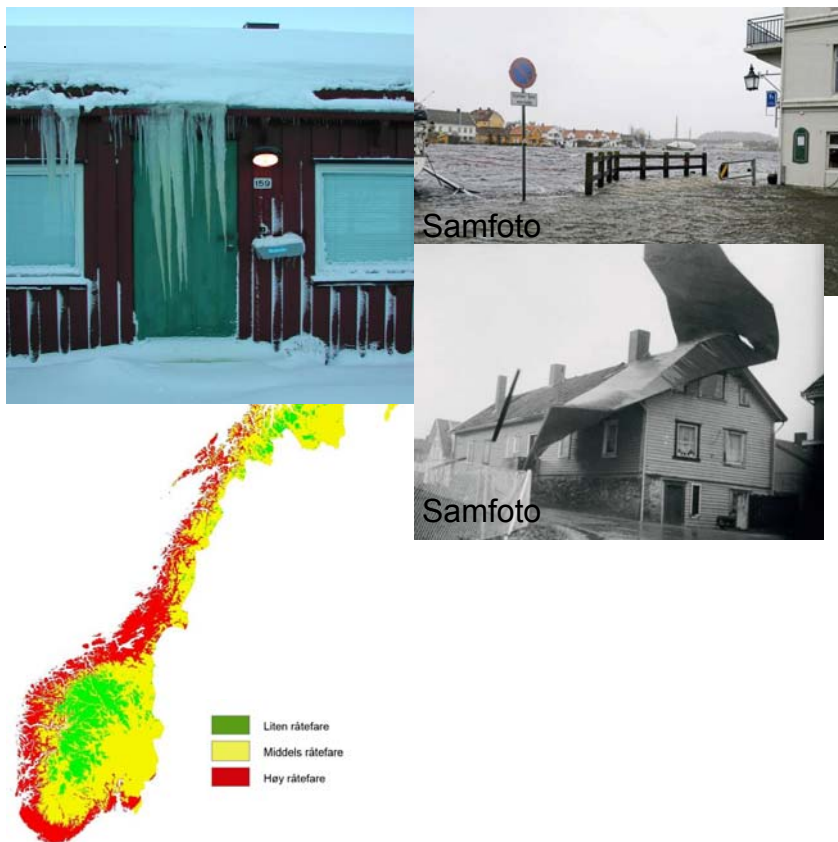


Figure 1. Illustrations of climate loads on buildings. The map of Norway shows the risk of rot for wooden constructions calculated estimated climate files for the period 2021-2050. (Liten=low, middels=medium, høy=high).

This was the background for the initiative of the establishment of the large project/program *Climate 2000* (2000 – 2007). The project involved many partners from different parts of the building sector and the overall budget was approximately 8 million Euros. At that time Norway's largest ongoing research & development programme in the construction industry. The success of the programme has resulted in the two ongoing large research projects *CAB – Climate adaption of Buildings* (2007 – 2009) and *ROBUST - Robust envelope construction details for buildings of the 21. century* (2008 – 2010).

Five PhD fellowships has been attached to the *Climate 2000*-programme. Three PhD fellowships were mainly concerned with the development of advanced design and modelling tools and methods for risk and vulnerability assessments of building enclosure performance under the climate regime of today, and in a potentially more severe climate. Two PhD fellowships have been focusing on analysis of action patterns in the construction process and experimental research on moisture problems in critical structures. One PhD fellowship is attached to the *CAB-project* and another two PhD fellowship to the *ROBUST project*. About 50 master students have been part of the programmes doing their master thesis.

## 1.2 Building defects, regulations and dissemination of knowledge

Investigations carried out by SINTEF Building and Infrastructure (the former Norwegian Building Research Institute) have shown that the cost of repairing building damages in Norway amounts to 5 % of the annual investment capital in new building [1]. SINTEF has been investigating building damages for about 50 years. We note with regret that the amount of damages has not decreased over the years, and many types of damage related to different climatic impacts constantly recur in our files of investigated building damage. More than 75 % of all investigated damages are water and moisture damage. There has been a stronger focus on the negative effects of moisture in building materials on indoor climate and related health problems in recent years. Systematic evaluation of protection against moisture-related building damage has not commanded much attention in the construction industry. Technical issues concerning moisture content in materials and constructions are regarded only as one of many problematic elements throughout the different stages of construction and are often underestimated or ignored altogether. The ever-increasing demand in the construction industry for economy, progress and quality, coupled with heavy rainfall during the construction process, has proven to be a difficult combination. The need for specific guidelines for “moisture design” and weather protection in the construction process is evident.

The research programmes throughout the last 10 years has lead to more accurate criteria and codes of design, function and practice for the planning and construction of critical building structures and details, primarily identified with the building's external envelope, and with special emphasis on local weather conditions at the building site. The programmes have also entail a thorough knowledge of, and an emphasis on, the effects of climatic loads on building constructions. This has lead to better knowledge concerning higher level of personal safety in buildings, reduced administration and maintenance costs through correct planning and design, and finally better indoor climate due to fewer moisture failures. Thus the research programmes could also help reduce the costs involved in the repair of building failures and damages.

Since 1997 the technical regulations, or building codes, under the Norwegian Planning and Building Act have been performance based. The transition from a prescriptive to a performance-based code has strengthened the demand for supporting standards and design guidelines. The SINTEF Building Research Design Sheets in the Building Research Series ([www.sintef.no/byggforsk](http://www.sintef.no/byggforsk)) comply with the performance-based requirements in the building code, and are important references to “proved” solutions in the technical regulations. The principal objective of the Building Research Design Sheets is to adapt experience and results from practice and research in such a way that they can be of practical benefit to the construction industry. The main purpose is to provide guidelines, solutions and recommendations that encourage high quality in the planning, design and construction of buildings. The series consists of more than 800 design sheets, the first sheets being published in 1958. It is by far the most used planning and design tool amongst Norwegian architects and engineers and is found on nearly all

construction sites. The Design Sheets are continuously being updated to comply with the latest research, experience-based knowledge and building codes. However, the technical solutions presented in the Building Research Series are in general meant to have a reliability level suitable for all parts of the country. The “robustness” of the Norwegian building stock, including the development of methods for classifying different climatic parameters and their impact on building enclosure performance, has been addressed as part of the research & development programmes throughout the last decade [2].

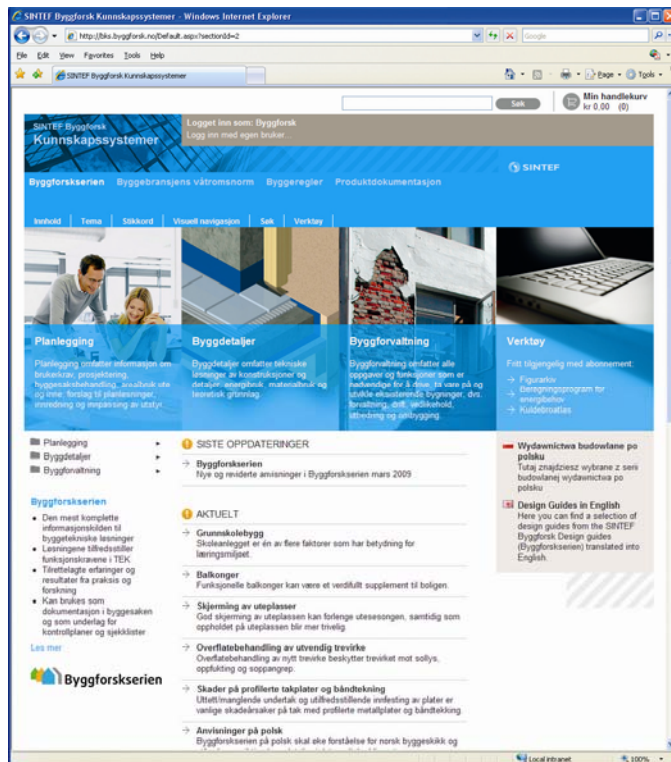


Figure 2. The SINTEF Building Research Design Sheets in the Building Research Series ([www.sintef.no/byggforsk](http://www.sintef.no/byggforsk)) comply with the performance-based requirements in the building code, and are important references to “pre-accepted” solutions in the technical regulations.

### 1.3 Energy-efficient buildings and environmental impact – towards zero emission buildings

Both worldwide and in Europe buildings account for about 40% of all primary energy use and therefore contribute to significant greenhouse gas emissions. A combination of making buildings more energy-efficient and use a larger fraction of renewable energy is therefore a key issue to meet the global challenges related to climate change and resource shortages. However, achieving substantial reductions in energy use and greenhouse gas emissions from this sector requires much more than incremental increases in energy efficiency. Currently, a prominent vision proposes so called “net zero energy”, “net zero carbon” or even “plus energy” buildings. Although these terms have different meanings and are poorly understood, several IEA countries have adopted the vision of zero emission buildings as a long-term goal of their building energy policies (CA, DE, UK, USA, NL, NZ). According to the Recast of the Directive on energy performance of buildings (EPBD)[3], member states will be required to actively promote the higher market uptake of buildings of which both carbon dioxide emissions and primary energy consumption are low or equal to zero, by producing national plans with clear definitions and targets for their uptake. Buildings in Norway are accountable for about 40% of the country’s total energy use and about

50% of the electricity use. A special feature of energy use in Norwegian buildings is that a large share (around 70%) of the heating load is covered by direct electric heating. Efforts to reduce the heating load and substitute electric heating with heat from new renewable energy sources are paramount in the Norwegian energy policy.

Realizing zero-emission buildings will require development of new, very high quality building products and systems that are robust with respect to future user requirements and future climate and political changes. Due to rather harsh and variable climate conditions and a high quality building tradition, the Norwegian industry has a competitive edge with respect to developing and exporting high performance products and services. Facing the future risks of climate change, Norway also provides a unique “laboratory” for testing the robustness of new building envelope solutions.

## **2. Building Enclosure Performance in a More Severe Climate - Focus areas**

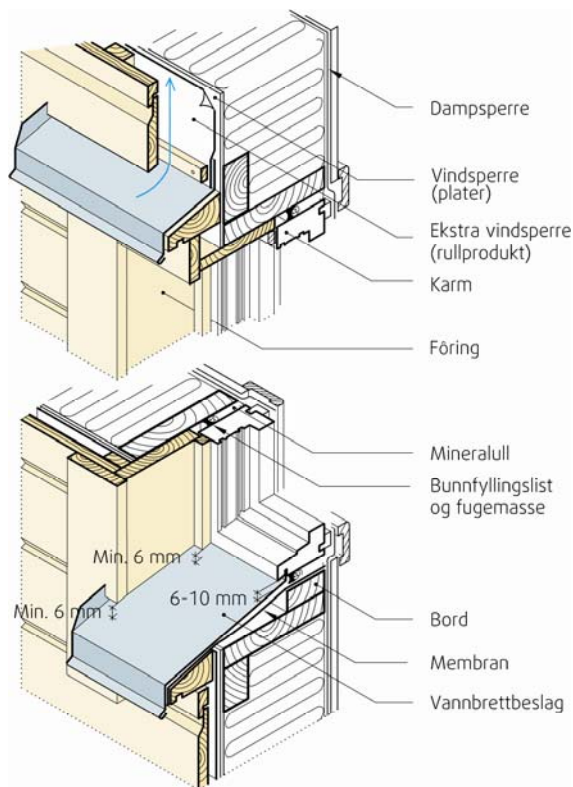
The last ten years the main field of research related to climate adaption of buildings has been:

- Impact of climate change on the Norwegian building stock and building practice
- Climate exposures on buildings
- Increased snow loads on roofs
- Increased wind actions on buildings
- Snow drift and snow accumulation around buildings and in terrain
- Investigation of compact and ventilated insulated roofs
- Design of weather-protective flashings
- Impacts of wind speed and temperature variations on moisture transfer in building materials
- Thermal insulation and frost protection of slab-on-grade foundations
- Atmospheric icing
- Requirements for façade systems in relation to driving rain loads
- Moisture protection of underground structures
- Driving rain data for calculation and design
- Air tightness of the building envelope
- Moisture conditions in heavily insulated constructions
- Moisture in buildings and microbiological growth
- Weather protection in the construction process
- Process related moisture problems in buildings – critical decisions in planning and design
- Climate adaption of buildings – methods for dissemination of knowledge
- Vacuum insulation panels in various wall structures

A selection of working tasks, achieved results and output is presented in the following chapters. A reference to an article, report etc. where the work is thoroughly presented is given for all the research areas described here.

### 3. Design of Weatherboard Flashing for Severe Climates [4]

The principal function of weather-protective flashings is to serve as an outer rain shield in a two-stage tightening, and to act as a mechanical safeguard for any underlying tightening layer, e.g. roofing. Flashing should be designed and installed so that precipitation is directed away from the structure, and not be allowed to penetrate beneath the flashing with the risk of leaks. The flashing material must withstand the climatic loads to which it is exposed. Achieving such results often proves to be difficult in practice. In [5] we have carried out a comprehensive investigation of process induced building defect cases associated with weather-protective flashing.



*Figure 3a*  
Guidelines in [7] and [8] showing a good performing window in a wall. When the turn up of the weather-protective flashing board is inside the wind barrier the requirements of the rain- and airtightness details have to be strict in order to make such a solution be robust.



*Figure 3b*  
Test area undergoing driving-rain tests in a RAWI-box (turnable equipment for full-scale RAin and WInd tightness testing).

The investigation showed that certain faults and deficiencies are recurring items. Windowsill/weatherboard flashing comprises as much as 41% of the building defect cases associated with weather-protective flashing. The development of flashing solutions and techniques in Norway is primarily based on experience and field investigations of unfortunate or ill-advised solutions. Thus, there is a clear need to obtain further knowledge on the performance and durability of the most commonly used solutions. In this chapter are presented some results from laboratory investigations conducted in order to analyse the climatic performance of various types of weatherboard flashing. The main objective of the presented work has been to obtain a basis for the ranking of different flashing designs in different climates. The test programme encompasses flashing variants that are expected to be good, inferior or possibly deficient/unsatisfactory.



The results clearly confirm the importance of i.e. pressing the turned-up edge of the weatherboard flashing up against the bottom of the windowsill groove and that an end turn up within the window recess is essential in order to prevent water running in behind the cladding when exposed to driving rain. See also figure 3. In order for the water to be drained away, and the window frame to dry out, a minimum 6 mm clearance must be provided between the windowsill and the remainder of the flashing. Furthermore, the testing confirmed that folded corners are an advisable solution for ensuring completely watertight corners. The investigation has provided valuable knowledge on the design and construction of weatherboard flashing. The results are applicable also to other flashing variants. The results from the investigation, revised and improved high-performance flashing solutions, have been incorporated in the appropriate SINTEF Research Design Sheets [7] as shown in figure 3 and in [8].

#### **4. Moisture and temperature conditions in cold lofts and risk of mould growth [9]**

A theoretical study of moisture and temperature conditions in cold lofts and the risk of mould growth on the roof underlay in various climates in Norway have been performed.

Roofs with cold lofts can be ventilated in two alternative ways:

1. Cold, ventilated loft. The loft is ventilated directly through openings to the loft at the eaves, at the ridge or in the gables.
2. Cold, non-ventilated loft. By using an underlay with low vapour resistance,  $s_d < 0,5$  m, and ventilating the air gap between the roofing and the underlay, the batten space, no ventilating openings into the cold loft are needed. The moisture will dry out by diffusion through the vapour permeable underlay and further out of the roof by airflow through the ventilated batten space.

The later roof alternative – 2-, non-ventilated loft, has been introduced the latest years and is recommended for undetached houses and other multifamily houses to reduce the risk of fire spreading. There have been several large fires through the years where the fire has spread from windows, through the ventilating openings at the eaves and into the cold loft and further to the neighbouring dwellings. Other advantages of cold, non-ventilated lofts are reduced risk of snow drifting into the loft and reduced heat loss due to reduced airflow through the roof insulation.

The theoretical study referred in this work show the advantage of using roof underlay with as low vapour resistance as possible. During the last 10 to 15 years several thin underlay products with very low vapour resistance,  $s_d < 0,2$  m, has been introduced to the building market. The good drying out capability of roofs using these types of underlay materials has been demonstrated by several studies, se e.g [10].

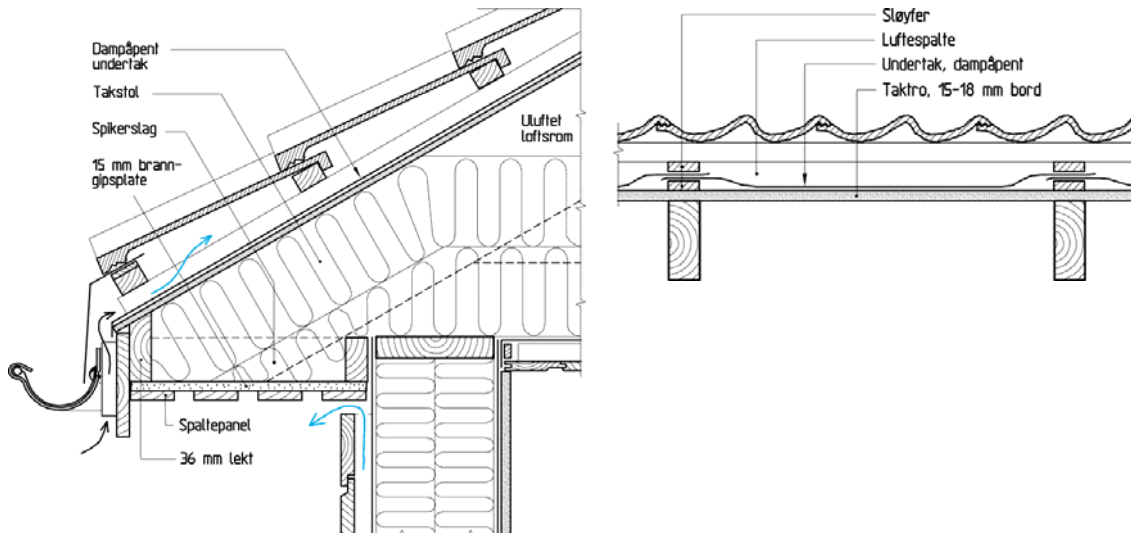
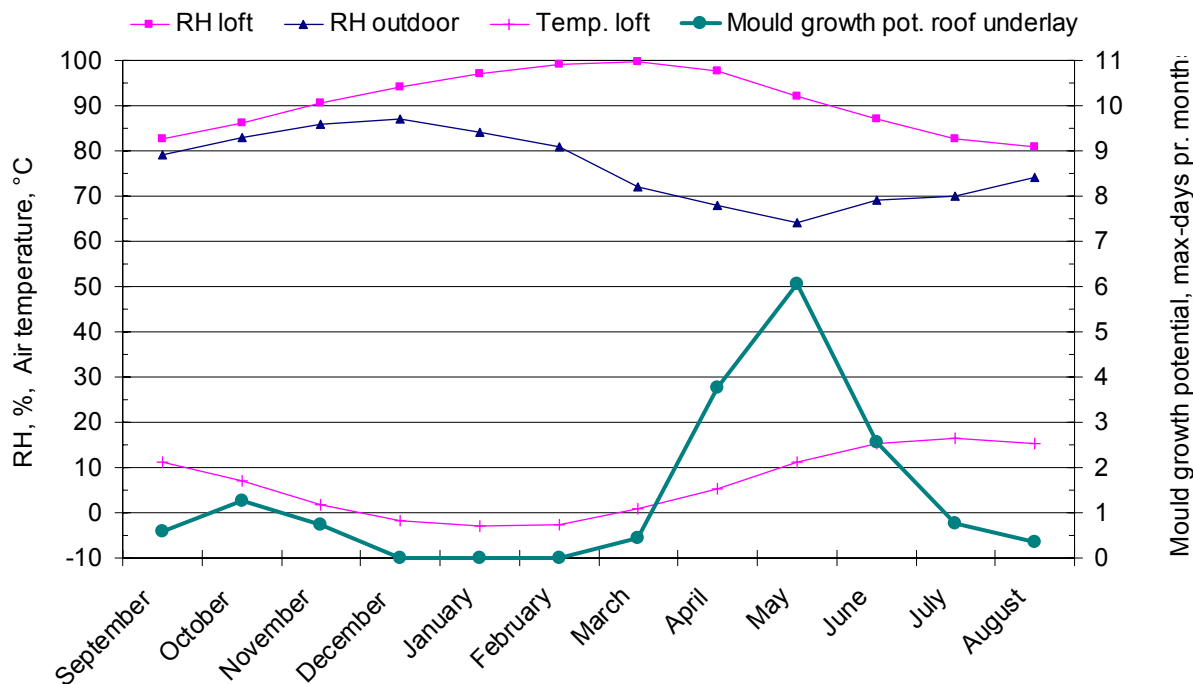


Figure 4. Pitched roof with cold, non-ventilated loft. To improve the resistance against spread of fire there are no openings to the loft at the eaves or at the ridge. The necessary ventilation of the roof is achieved by air flowing through the air gap between the roofing and the underlay, the batten space.

The computational model developed for this study calculates the heat, air, and moisture balances within the loft considering parameters describing the building, building materials, outdoor climate as well as parameters influenced by the occupants. Both stack effect and air leakage distribution are included in the model as air leakages play a key roll both for the moisture content of the indoor air and for the moisture transport in and out of the loft. In order to perform quantified parameter studies a mould growth potential is introduced. By using simplified relations between the relative rate of mould growth and temperature and relative humidity, respectively, a total mould growth potential is summarized for successive calculation periods. Traditionally cold lofts in Norway have been vented, by openings at the eaves, gables and the ridge, in order to prevent snow melting and to give the roof drying out capability. Closed lofts, without openings to the exterior, however, have several advantages like improved protection against spread of fire reduced risk of snow drifting into the loft and reduced heat loss due to reduced air flow through the roof insulation.

The study shows that closed cold lofts may be constructed with low risk of mould growth. The roof however, has to be correctly designed using roof underlay with sufficiently low vapour resistance and a ventilated air space between the roofing and the roof underlay.



Oslo, 2 floors, total floor area: 150 m<sup>2</sup>, leakage number: 4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h50Pa), sd-value of roof underlay: 0.5 m, moistureproduktion: 10 kg/d, basic ventilation: 0.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h), mold growth pot.: 16 max days

Figure 5. The figure shows an example of how calculated temperatures and RH in the loft and mould growth potential on the roof underlay varies through a year. The mould growth rate is highest in the spring as the temperature in the loft is increasing and low in late autumn and winter when the temperature is low.

## 5. Moisture and Mould Growth in Compact Roofs

### 5.1 Results from a Three-Stage Field Survey [11]

Compact roof systems that are done right, using materials that are not mould-prone between a correctly installed vapour barrier and the roof waterproofing membrane, have typically been considered to be not very moisture sensitive. Moisture in compact roofs has therefore perhaps not received sufficient attention. With large precipitation amounts in southern Norway in the fall of 2000, the theme of built-in moisture in compact roofs again became relevant. Both in connection with roof work during periods with heavy precipitation and for example, from leakage, relatively large amounts of moisture can get trapped in the roof.

The most frequent questions have generally been along the lines: What happens in the long and short term in cases where moisture has been allowed to penetrate the construction? What kind of problems can we expect? Will moisture result in dripping from the roof, corrosion of fastenings, reduced insulating capabilities, rotting of roof woodwork and/or mould formation in the future? Will moisture in the roof construction create problems of such a nature that all moist materials must be replaced, or will there be sufficient natural dehydration through the roofing, parapets, etc. whereby these problems would be avoided?

The paper [11] summarizes some of the results from the field study that was performed in order to investigate how flat, compact roofs behave over time when moisture has been trapped in the construction. The investigation includes 12 roofs. 10 of the 12 roofs were chosen among roofs we

knew had considerable problems with built-in moisture during the building period (fall 2000). Two of the roofs did not have any previously known moisture problems, and were therefore to act as reference roofs. Nine of the roofs were inspected in 2002, 2004 and 2007.



Figure 6. The roof of a public health building, one of the 12 roofs investigated.

Even though the majority of compact roofs covered by this field investigation had moisture problems during manufacturing, the extent of moisture problems are decreasing. Compared to what was assumed beforehand, measurements in several of the roofs showed that dehydration was so extensive that mechanisms other than pure diffusion through the roofing or inward diffusion had possibly been a dominant factor in several instances. Other mechanisms contributing towards drying out may be convection currents in the roof and outward diffusion via the parapet, as well as lesser incidental air currents through all or portions of the roofs surface. Microbiological growth observed inside the compact roofs are limited, confirming a small potential for growth in such constructions. This is due to the general robustness of the thermal insulation regarding growth and unfavourable maximum temperature amplitude ( $> 60^{\circ}\text{C}$ ). We assess a limited or negligible impact of indoor air quality caused by the observed microorganisms inside the investigated compact roofs.

## 5.2 Compact wood frame roofs with built-in-moisture, test house measurements of the drying potential and risk of mould growth [12]

A typical flat or low-sloped compact roof has an insulation layer between the vapour barrier and a roofing membrane. The typical load bearing structure is a concrete or corrugated steel deck. Compact non-ventilated wood frame roofs, usually in the form of prefabricated elements, are also used to some extent. The drying potential of such unventilated constructions are normally limited. This makes this type of roof vulnerable for moisture during the construction period. The consequences may be microbial growth (mould and/or rot) on vulnerable materials such as wood. The drying potential may however be enhanced by certain measures.

Recent years it has been a high focus on possible negative health effects related to moisture in buildings. Mould growth has often been mentioned as one of the main negative factors in this respect. Even though one still has not managed to conclude what effects mould damages in buildings has on single individuals, it is established knowledge that there are an increased risk for health effects such as respiratory symptoms, asthma and allergy in both adults and children living in buildings with moisture related problems [14], [15]. In this aspect there is a need for knowledge regarding what level of hygrothermal conditions gives mould growth on different materials and in different structures.

In this study the drying potential of various configurations of compact wood frame roofs with a high level of built-in-moisture has been investigated, through test house measurements and hygrothermal simulations, see figure 7. Roof elements has been wetted, and mould spores has been added to the elements. The hygrothermal conditions of the elements has been monitored through a period of 2 years, and the microbial conditions has also been registered.

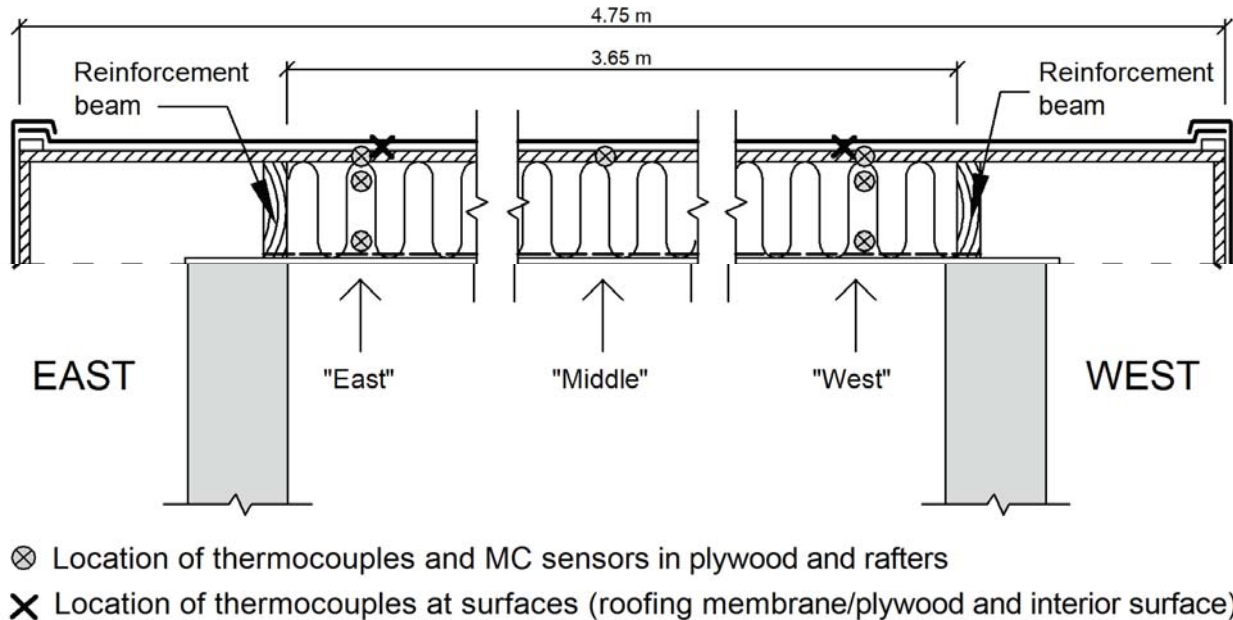


Figure 7. A simplified sketch of the roof investigated. A photo of the whole building is shown in figure 10.

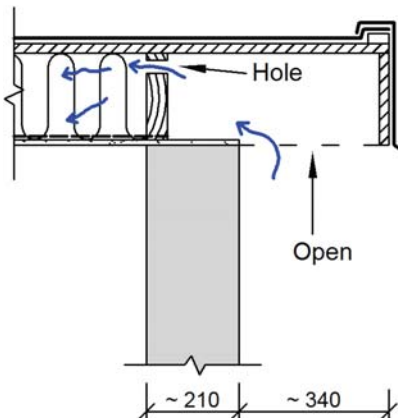


Figure 8. Example of an open cornice. Two holes ( $d = 30$  mm) were drilled in the top part of the reinforcement beam (cc 0,6 m).

The possible positive effect of intended or unintended drying of built-in moisture by air leakages of outdoor air through the insulation layer has been investigated in this study. The measurements and the hygrothermal simulations showed a significant faster rate of drying for roof elements with a higher degree of ventilation (with small ventilation holes drilled at the edge of the roof, see figure 8). The drilled ventilation holes are equivalent to a continuous 1 mm opening at each side of the roof. Under windy conditions the wind pressure difference between the leeward and

windward side will cause air to flow through the insulation layer of the roof, at a rate depending on; the size of the roof (and the air permeability of the insulation), the air pressure difference between the inlet and outlet and the air flow resistance at the inlet and outlet. The measurements also showed that the dominating windward side of the roof dries faster than the leeward and middle part of the roof.

The measurements have been performed on a relatively small roof, with a length under 5 m. The drying effect of air flowing from one edge of the roof to the other will depend on the total air flow resistance, i.e. the air change rate will decrease for larger roofs. This means that the drying effect for such air leakages will be smaller for large roofs. It is of course possible to combine ventilation openings at the edges of the roof with vents mounted at top of the roof, shortening the distance between the air inlet and outlet. This could also be combined with ventilation grooves (channels) in the insulation, to decrease the resistance to the air passing through the insulation. It should however be mentioned that such ventilation as investigated in this article may have some negative consequences. The heat loss of the roof will increase due to this ventilation. This has not been investigated in this study. [13] reported however relatively minor increase of heat loss when using small ventilation grooves to ventilate the roof, i.e. the total increase of heat loss was between 0 -5 % depending on the thickness of the insulation. Another problem with such ventilation can be that if the vapour barrier is not air tight, warm and humid indoor air may be sucked into the roof and condensation may occur. Such ventilation should therefore only be used in buildings with relatively dry indoor air (such as office buildings), and the air tightness of the vapour barrier layer must also be good.

This study also investigated the microbial growth occurring in compact wood frame roofs, for a relatively high level of built-in-moisture. The measured moisture content was so high as to expect rather extensively mould growth in the roof. The observations showed however relatively little mould growth. One possible explanation for this is the high temperature levels (over 40 °C ) occurring during sunny periods, which stops the mould growth.

## **6. Mould growth on board-based wind-barrier products [16]**

Scrutiny of surveyed building damage examined by SINTEF during the period 1993 - 2002 has shown that more than 75 % is due to moisture, whereof 60 % can be related to design and construction of the outer climate shield [6]. In recent years there has been an increasing awareness of the negative effect of damp building materials on indoor climate and health and in the years to come it is highly likely that building materials, structures and exterior envelope surfaces will have to withstand ever-increasing climatic loads.

Knowledge about the properties of various materials regarding resistance to mould attacks is important now and will be even more important in order to predict and prevent attacks in building structures. The resistance to mould attacks of wind barriers in general and hard boards in particular has been discussed in the building sector in Norway. There for the main purpose of this investigation has been to chart the criteria for mould growth on various board-based wind-barrier products.

The construction period, before the external cladding has been installed, is the time during which board-based wind-barriers are exposed to the heaviest climatic loads. In exposed locations, materials will also be subject to moisture at a later time due to rain being driven through the cladding and onto the wind barrier. A wind-barrier layer must therefore be both water-repellent and be sufficiently watertight to prevent the wall within from becoming damp.

Four different board-based wind barriers were investigated during the experiments. Two were plasterboard-based and two were wood-fibre based (hardboard). The material samples were sterilised, conditioned, infected and incubated in climate boxes representing six differing environments with different temperatures and relative humidity (RH). The results of these experiments show that wood-fibre (hardboard) based wind-barrier boards have a comparatively greater resistance to mould growth than plasterboard-based wind-barrier boards. This is reflected both in the length of time up until proof of visible growth (detectable with the naked eye), and the extent of growth after incubation periods of 6 and 11 weeks.



Figure 9. An example of a building structure with a double wind barrier attacked by mould growth on the board-based wind barrier.

## 7. Hygrothermal conditions in wooden claddings - Test house measurements [17]

In Trondheim, a city in the middle of Norway, different variations of wood cladding design have been used on a test house, see figure 10. The aim of this investigation have been to increase our understanding of the relation between microclimatic conditions and the responding performance of wooden claddings, according to orientation, design of ventilation gap and wood qualities. On each of the east and west façades of the test house 14 full height test sections were arranged. Each of these test sections had a specific variant of cladding. The following parameters were varied:

- Driving rain exposure (orientation)
- Ventilation gap opening at top and bottom of cladding
- Surface treatment of the cladding
- Growth rate of wood

The driving rain exposure varies considerably between the western and eastern oriented facades. While the western facades are exposed to a high amount of driving rain, only small amounts of driving rain reaches the eastern oriented facades.

The test claddings were horizontally fixed boards of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst). The timber claddings (rain screens) were assembled by a series of boards fixed to vertical support battens (with thickness 23 mm) which were designed to allow uninterrupted drainage and ventilation of the cavity behind the cladding. The ventilation gap opening at top and bottom of the cladding were either 0 mm (no ventilation), 4 mm or 23 mm (full opening). The average dry density of the instrumented cladding boards were 385 kg/m<sup>3</sup> for the fast grown spruce and 460 kg/m<sup>3</sup> for the slow grown spruce. Two types of surface treatments were investigated; a water dispersed acrylic/alkyd painting and an oil dilutable alkyd painting.

The measurements in the wall constructions started in January 2004 and lasted till December 2005. The logging system stored hourly values. The cladding boards were instrumented with temperature sensors and moisture content sensors (in wood) at two different heights, respectively 1,0 m and 3,0 m from the bottom of the cladding. The results showed clearly that:

- Air gap openings in the top and bottom part of the cladding limits the moisture content in wooden claddings exposed to driving rain.
- An air gap opening in the top and bottom part of the cladding equivalent to a 4 mm continuous air gap is sufficient to limit the moisture content of wooden claddings exposed to driving rain.
- For climates, orientations or geometries where only small amounts of driving rain hits the wall the wooden cladding might even perform better with no planned air gap openings at all.
- The results showed relative little difference between oil based and water based paint in regard to the risk for decay and microbiological growth.
- Regarding untreated claddings we found that the risk for decay and microbiological growth was generally higher for these cladding types compared to painted claddings. It may however be said that even if the risk is higher with untreated claddings, the results do not indicate that the risk is critically higher.
- The results showed little difference between slow grown and fast grown spruce in regard to the risk for decay and microbiological growth.

These findings have been assessed and practical recommendations are given in the report [17]





Figure 10. The test house in Trondheim with the wall panels and the roof elements.

## 8. Air-tightness and air leakages of Norwegian wood-frame houses [18]

In [18] the air-tightness and air leakages of Norwegian wood-frame houses are dealt with. Air-tightness has become particularly important to achieve energy efficient buildings. The air-tightness requirements in the Norwegian technical regulations, TEK 2007 have become stricter, and the government has warned that even more strict requirements will come pretty soon. This leads to a growing interest for construction details that ought to be devoted special attention in planning and designing airtight buildings. This is the background for the PhD-study of Thor-Oskar Relander working in the CAB-project.

[18] presents the air-tightness of Norwegian wooden dwellings quantified by the air change rates at 50 Pa pressure difference. Some factors influencing the air-tightness are also discussed. A method for evaluating the typical air leakage paths in wood-frame houses is presented. Using this method on 19 houses, shows that the 3 most common air leakage paths were outer wall/ceiling, leakages in the ceiling and outer wall/floor. The paper is based on the project database of building defects assignments of SINTEF Building and Infrastructure. Consequently the findings cannot be statistical representative for Norwegian dwellings, but the more challenging parts of a wooden building has most likely been identified.

Laboratory measurements with the purpose of studying the influence of an element chimney and different sealing methods for windows have also been performed and published in this project. For results and details see [19] and [20]. For the time being we are working with large scale experimental set-ups in the laboratory studying air leakages paths between outer wall/floor and between foundation/wall. These results are not published yet.

## 9. Vacuum insulation panels in various wall structure arrangements [21]

Buildings account for a significant part of the energy use and greenhouse gas emissions. Therefore one has to improve the energy efficiency of buildings. Concepts like passive houses and zero emission buildings are being introduced. Applying traditional techniques and materials in these buildings will significantly increase the amount of traditional thermal insulation, e.g. wall thicknesses up to about 400 mm are expected in passive houses. Such large thicknesses are

not desirable due to several reasons, e.g. floor area considerations, efficient material use and need for new construction techniques. Hence, new highly thermal insulating materials and solutions are being sought. In this respect, vacuum insulation panels (VIPs) are regarded as one of the most promising existing high performance thermal insulation solutions on the market today. Thermal performance typically range 5 to 10 times better than traditional insulation materials (e.g. mineral wool), leading to substantial slimmer constructions. However, the VIPs have several disadvantages which have to be addressed. The robustness of VIPs in wall constructions is questioned, e.g. puncturing by penetration of nails. Moreover, the VIPs can not be cut or fitted at the construction site. Furthermore, thermal bridging due to the panel envelope and load-bearing elements may have a large effect on the overall thermal performance. Finally, degradation of thermal performance due to moisture and air diffusion through the panel envelope is also a crucial issue for VIPs. In this work, laboratory investigations have been carried out by hot box measurements. These experimental results have been compared with numerical simulations of several wall structure arrangements of vacuum insulation panels. Various VIP edge and overlap effects have been studied. Measured U-values from hot box VIP large scale experiments correspond quite well with numerical calculated U-values when realistic and measured values of the various parameters are used as input values in the numerical simulations.

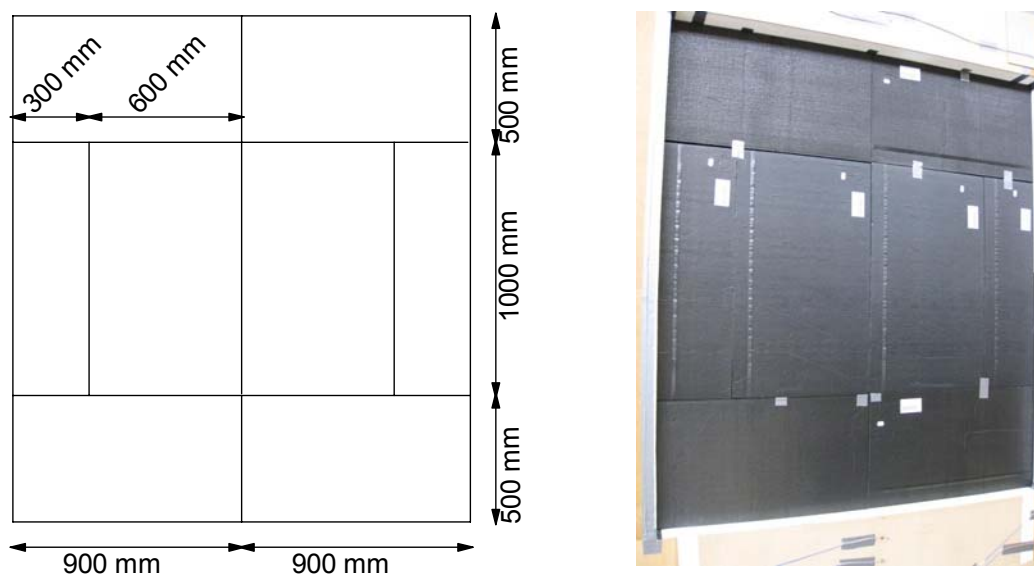


Figure 11. VIP configuration with staggered joints for hot box measurements.

## 10. Zero Emission Buildings

In February 2009, the Research Council of Norway assigned the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) to host the Research Centre on Zero Emission Buildings (ZEB), which is one of eight new national Centres for Environment-friendly Energy Research (FME). The centre is a collaboration between NTNU, SINTEF and a large consortium from the building sector. The main objective of the FME-centres is to contribute to the development of good technologies for environmentally friendly energy and to raise the level of Norwegian expertise in this area. In addition, they should help to generate new industrial activity and new jobs. The centres have been selected primarily on the basis of the scientific merit of their research, and their potential to reduce greenhouse gas emissions and to generate innovation and value creation. The Research Council of Norway has been responsible for selection. Over the next eight years, the FME-Centre ZEB will develop competitive products and solutions for

existing and new buildings that will lead to market penetration of zero emission buildings related to their production, operation and demolition. The ZEB Centre consortium encompasses about 20 members from the building sector.



Figure 12. There is no doubt about the vision and the aim of the project ([www.wbcsd.org](http://www.wbcsd.org)).

The vision of *The Research Centre on Zero Emission Buildings, ZEB*, is to eliminate the greenhouse gas emissions caused by buildings. This national research centre will place Norway in the forefront with respect to research, innovation and implementation within the field of energy efficient zero-emission buildings.

The main objective of ZEB is to develop competitive products and solutions for existing and new buildings that will lead to market penetration of buildings that have zero emissions of greenhouse gases related to their production, operation and demolition. The Centre will encompass both residential and commercial buildings, as well as public buildings.

In addition to being highly energy-efficient and carbon-neutral, the buildings and related solutions also have to fulfil a range of other criteria in order to be competitive. They need to provide a healthy and comfortable indoor environment and be flexible and adaptable to changing user demands and needs. They need to be cost-effective, i.e. give economic benefits to producers, users and the society. They need to be architecturally attractive and easy to construct, use, operate and maintain. Finally, they need to have minimum environmental impacts during production, use and demolition, and be robust with respect to varying climate exposure and future climate changes.

The Research Centre focuses its work in five areas that interact and influence each other:

- WP-1: Advanced materials technologies
- WP-2: Climate-adapted low-energy envelope technologies
- WP-3: Energy supply systems and services
- WP-4: Energy efficient use and operation
- WP-5: Concepts and strategies for zero emission buildings

*Work package 2 Climate-adapted low-energy envelope technologies* will be dealing with the building envelope and building physics challenges. We are in the progress of starting up the work and the research will be related to tasks dealing with

- *Optimal thermal performance*; To develop climate adapted and verified solutions for a selection of new and existing building envelopes (roofs, walls, and floors).
- *Integration of elements in the building envelope*; To develop and verify climate adapted and moisture safe solutions for new and rebuilt solutions with elements integrated in the building envelope
- *Daylighting and solar shading systems*; To develop solutions for daylighting and solar shading in ZEBs that reduce energy use for lighting and cooling and that provide a high quality indoor environment. The solutions are to be appropriate for cold climate zones.
- *Windows and glazing systems*; To develop appropriate solutions for windows and glazing systems for ZEBs

The aim is good buildings for a sustainable future. We shall have focus on low-energy technology, and the solutions should be climate adapted so that they can work in Nordic climate. We shall work with new buildings, but as important is existing buildings. We shall work with dwellings, schools and office buildings. The ambition is that the project shall follow 6 to 8 pilot projects throughout the 8 years period. We are in a process searching for projects with extremely high energy goals.

See also [www.sintef.no/projectweb/zeb](http://www.sintef.no/projectweb/zeb)



*Figure 13. An office building in Austria with solar cell panels integrated in the roofing above the square area. Solar energy is not widely used in Norway, perhaps it will be in the future years to come?*

## Summary

This paper gives a brief overview of some of the results in the research field of climate adaption of buildings performed at SINTEF Building and Infrastructure and NTNU in Norway throughout the last 10 years. The research group has been successful in having funded several large research programs and projects in this period with the *Climate 2000* project as the first one. *CAB - Climate Adapted Buildings* and *ROBUST* have been built on the success of the *Climate 2000* project. The vision, goals and the working tasks of the new research centre in progress *Zero Emission Buildings (ZEB)* is also described briefly.

The Research Council of Norway (NFR) and the participation of organisations in the building sector are greatly acknowledged.

## References

- [1] Ingvaldsen, T., Byggskadeomfanget i Norge. Prosjektrapport 163, Norges byggforskningsinstitutt. Oslo, 1994 (In Norwegian)
- [2] Lisø, K. R. 2006. Building envelope performance assessments in harch climates: Methods for geographically dependent design, Doctoral Theses at NTNU, 2006:185.
- [3] Recast of the Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, November 2008.
- [4] Kvande, T., Lisø, K.R. and Bergheim, E., 2005, Design of Weatherboard Flashing for Severe Climates, Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, the Icelandic Building Research Institute, Reykjavik Iceland 2005
- [5] Lisø K.R., Kvande T. and Thue J.V. (2005). High-performance weather-protective flashings, *Building Research & Information*, 33(1), 41-54.
- [6] Lisø, K. R., Kvande T., et al. 2006. Learning from experience – an analysis of process induced building defects in Norway, *Research in Building Physics and Building Engineering – Fazio, Ge, Rao & Desmarais (eds)* 425-432
- [7] SINTEF Building Research Design Sheets ([www.sintef.no/byggforsk](http://www.sintef.no/byggforsk))
- [8] Lisø, K.R, Kvande, T., Klimatilpasning av bygninger (Climate adaption of buildings), SINTEF Byggforsk, 2007, ISBN 978-82-536-0960-7 (In Norwegian)
- [9] Uvsløkk, S., (2005) Moisture and temperature conditions in cold lofts and risk of mould growth, Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, the Icelandic Building Research Institute, Reykjavik Iceland 2005
- [10] Ojanen, T. (1999). Moisture Performance of Sealed Roof System with Vapour Permeable Underlay, Proceedings of the 5th Symposium of Building Physics in the Nordic Countries, CTH, Göteborg, Sweden, p. 425-432.
- [11] Holme, J., Noreng, K., Kvande T., Results from a Three-Stage Field Survey, Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, (C. Rode ed.) Report R-189, Dept. of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby:
- [12] Geving, S. and Holme J., 2009, Compact wood frame roofs with built-in-moisture Test house measurements of the drying potential and risk of mould growth, Project report 38, SINTEF Building and Infrastructure (ISBN 978-82-536-1092-4 (pdf))
- [13] Salonvaara, M. and J. Nieminen. 2002. Hygrothermal performance of low-sloped roofs with groove ventilation. Proceedings of 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, June 17-19th, pp. 239-246.

- [14] Bornehag, C.G., Blomquist, G., Gyntelberg, F., Jarvholm, B., Malmberg, P., Nordvall, L., Nielsen, A., Pershagen, G. and Sundell, J. 2001. Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to "dampness" in buildings and health effects (NORDDAMP). *Indoor Air*, 11, 72-86.
- [15] Bornehag, C.G., Sundell, J., Bonini, S., Custovic, A., Malmberg, P., Skerfving, S., Sigsgaard, T. and Verhoeff, A. 2004. Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multidisciplinary review of the literature (1998-2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects. *Indoor Air*, 14, 243-257.
- [16] Holme, J., 2009, Mould growth on board-based wind-barrier products, Research in Building Physics and Building Engineering – Proceedings of the 4th International Building Physics Conference, Istanbul Technical University, Istanbul, June 15 – 18, 2009.
- [17] Geving S., Erichsen T.-H., Nore K., Time B.,(2006) Hygrothermal conditions i wooden claddings – Test house measurements, Project report 407, Norwegian Building Research Institute (now SINTEF Building and Infrastructure). ISBN-13 978-82-536-0931-7
- [18] Relander, T.O., Thue, J.V., Aurlien, T., Kvande, T. and Time, B., 2009: Airtightness and air leakages of Norwegian wood-frame houses, Research in Building Physics and Building Engineering – Proceedings of the 4th International Building Physics Conference, Istanbul Technical University, Istanbul, June 15 – 18, 2009.
- [19] Relander, T.O., Kvande, T., Thue, J.V., 2009: The influence of Lightweight Aggregate Concrete Element Chimneys on the Airtightness of Wood-frame Houses. *Energy and Buildings* ISSN: 0378-7788 Imprint: ELSEVIER (submitted)
- [20] Relander, T.O., Thue, J.V. and Gustavsen, A., 2008: The influence of different sealing methods of window and door joints on the total air leakage of wood-frame buildings, Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, (C. Rode ed.) Report R-189, Dept. of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby: 497-504
- [21] S. Grynning, B. P. Jelle, S. Uvsløkk, R. Baetens, V. Meløysund, T. Haavi and A. Gustavsen, "Comparison of Laboratory Investigations and Numerical Simulations of Vacuum Insulation Panels in Various Wall Structure Arrangements", Submitted for publication in Proceedings of the 9th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS 2009), London, England, 17-18 September, 2009.

# **Risk of performance failure in new and retrofitted low-energy building envelopes**

Carl-Eric Hagentoft  
Building Physics, Chalmers University of Technology

## **Abstract**

Risk of performance failure exists both for old and new buildings. Change in building design such as the use of low-energy building technology gives rise to new possible risks. A number of possible risks are outlined in the paper. A simplified method for risk assessment coupled to moisture conditions and mould growth is also presented.

## **1. Introduction**

Changing the building envelope design, by means of improved thermal insulation and improved air tightness, is frequently introduced in order to achieve better performances both for new buildings and in retrofitting of old ones.

From the early 70's, very often the reduction of the energy demand has been in focus. Additional thermal insulation in external wall assembly, cold attic floor, floor structures and basement walls, air tightness of windows/new windows are a few examples where it can go very wrong, that is, if it is not combined with a hygrothermal analysis showing the consequences for moisture safety and indoor air quality. Three coupled physical processes (HAM: Heat, Air, Moisture) create temperature and moisture conditions in rooms and structures. From this, together with improper choice of materials, lack of durability, mould growth and poor indoor air quality might follow. We are now facing a new generation of low energy buildings and energy efficient retrofitting measures, driven by economy, climate change and new legislations. It is of outmost importance to identify major risks for the existing building stock when introducing new retrofitting techniques. It is also important to analyse the risk when introducing buildings with new technology in order to improve energy efficiency.

Efforts of energy efficiency improvement of buildings will be taken by several stakeholders in most countries now and in the near future. Owners of one-family houses, apartment houses, industrial, institutional and governmental buildings are natural stakeholders. It is of each nations interest to reduce the future needs for heating (and cooling), reduce the CO<sub>2</sub>-emissions to approach more sustainable buildings and society. The existing building stock represents a main part of each country's wealth and should not be compromised by improper retrofitting techniques that will lead to bad investment, deteriorating instead of improving the quality of buildings. This is also important for investment in new buildings and new innovative and maybe risky design.

Tools for assessing the risk of performance failures are required in order to make better overall risk assessments accounting for the economical risk involved coupled to maintenance, operating and capital costs. In this way more balanced and sound investment decisions can be made.

The possible risk with new low energy buildings and retrofitted old ones are manifold and will be outlined in this paper. The risk assessment coupled to mould growth in building structures and surfaces are exemplified and discussed.

## **2. Possible performance failures in new low energy buildings and in retrofitted old ones**

The top-level performances are coupled to a healthy indoor environment for the users of buildings, i.e. good:

- Indoor air quality
- Thermal comfort

The demands from the society and the users are also coupled to energy and resource efficiency:

- Energy
- Durability

In order to make analyses and measurements of buildings and design options feasible various sublevel performances are introduced such as:

- Thermal protection
- Wind protection
- Rain protection
- Moisture safety
- Air tightness
- Frost safety
- ...

Unfortunately, the questions concerning performances do not always have a yes or no answer. It is more the probability that might be evaluated. Sometimes one design works fine and sometimes it fails. Slight differences in weather, workmanship, material properties, user behaviour etc. make a difference. Once we can say something about the probability we can also start evaluating risk in terms of failure, costs, etc.

## **3. Examples – Moisture safety for ventilated spaces**

Problems with high humidity levels and mould growth in cold attics have been increasing over the last few years. A recent Swedish study [1] showed that as many as up to 60 – 80 % of the single-family houses in Västra Götaland (largely, the Göteborg region) are showing significant mould growth and thereby risk developing serious problems. The high humidity levels are to a large extent a consequence of the increasing demand on energy efficiency. Houses are frequently retrofitted with additional attic insulation, which leads to a colder attic space and hence a higher humidity. Furthermore, furnace heating is often replaced in favour of heat pumps or district heating. This may alter the air-pressure balance of the house, resulting in an increased air pressure on the ceiling with subsequent air-leakage up to the attic.

An important moisture source influencing the attic hygrothermal condition is the water vapour in the surrounding air. The air is carrying moisture from the indoor environment through air leakages of the attic floor and from the ventilation of the attic itself. High relative humidity during long periods is very often found in cold attics. This can lead to mould growth on the roof



underlay often made of plywood or wood. Under cooling of the roof due to sky radiation, increase the problem. The moist air might condensate on the underlay and small droplets of liquid water can build up. The water will then be absorbed and accumulated in the surface area. High moisture content can even lead to rot.

Studies [2] show how air is moving both upwards and downwards through the attic floor, in time, depending on varying wind pressure, temperature conditions and ventilation system. Even with an exhaust ventilation system in the building, air is frequently flowing down from the attic to the living areas.

Also outdoor ventilated crawl-spaces are known for lacking moisture safety. The hygrothermal problem is complex were the level of thermal insulation; ground conditions and ventilation play a role. Very often the situations create poor indoor air quality due to smell and emissions carried by upwards-moving air through cracks and leakages through the floor.

In a recent publication by Samuelson et al [3], a number of building structures are analysed with regards to moisture safety.

#### **4. Possible problems with new low energy buildings**

In a recent study by Sikander et al [4], possible problems with performances of new low energy buildings such as “passive houses” were screened. The following list is given in the reference and targeted for more detailed investigations:

**Moisture safety:** The thermal insulation levels and colder building structure areas lead to more moisture sensitive building envelope parts. This is discussed more in this paper.

**Air exchange rates and demand driven ventilation:** Reduced ventilation rates during certain periods of the day or days might lead to higher indoor moisture supplies as well as degradation of the indoor air quality.

**Kitchen fans with no exhaust air:** Recirculation of filtered air reduces energy losses and is an alternative in air tight buildings. However, it will increase the indoor moisture supply and insufficient filtering capacity might lead to poor indoor air quality. During cooking it might also lead to peaks in the indoor air temperature.

**Air quality of the mechanically supplied air:** It is important to use good air filters that are exchanged with new ones on a regular basis. When the supply air is used for both the ventilation and the heating demand there might be an unbalance that leads to insufficient heating or overheating. This is specially the case when a central heating or heat exchange device is used giving a common supply air temperature. High supply air temperatures can lead to insufficient mixing of air in the rooms. Too high supply air temperatures might also lead to “burnt dust” smell. Air ducts located in the insulation of the building envelope or in spaces outside thermal insulations of the building can lead to excess heat losses.

**Thermal comfort:** Too high indoor temperature can occur during the summer periods especially due to solar radiation. The design and orientation of windows is important. During periods without heating demand the air heat exchanger should not be active. Sufficient airing or forced mechanical ventilation should be possible as well as the use of shading devices.

Is the thermal comfort in zones close to windows satisfying during cold periods?

**Sound environment:** Reduced transmission of noise from the surroundings can lead to discomfort for some persons. Reduced noise levels can lead to situations when the occupants find that other sources of noise, such as neighbors and fans, will be more irritating. A good design of the ventilation system, not leading to excess noise, is of major importance.

**Light environment:** Windows with low U-values reduce the transmission of daylight to the interior. Thick walls and the interior angles and surface treatment of the interior sides of the windows influence the interior light environment. How will the occupants be influenced by low-energy light sources?

**Air tightness:** In order to maintain a low energy demand, air tightness is of great importance. Will the building maintain good air tightness over time?

**Frost heave:** Well insulated foundations leads to smaller heat losses down wards. The increasing risk of frost heave must be considered and foundations should use appropriate designed perimeter insulation.

**Future internal heat gains:** The internal gains might be lower in the future when house hold appliances and light sources are more energy efficient. Also the number of persons in the house hold might drop.

**Durability of energy efficiency:** Durability of U-value of windows and the thermal insulation layers long term behavior should be considered. How well is energy efficiency maintained in connection to retrofitting measures? How well are building services, solar collectors, solar cells working on a long term basis? How robust are the technical solutions and how well are the maintenance kept?

**The behavior of the users:** For low-energy buildings the energy used for the heating is quite small. The major part of the energy demand comes from the use of warm water and electricity for house hold appliances and light. It is difficult to determine the energy demand of a building during the design phase, especially for a given building or apartment.

**The user's attitudes and expectations:** The buildings require maintenance and service. Will this be satisfied and accepted by the users? Are the expectations by the users (e.g. comfortable walking bare-footed and naked in the building during winter) reasonable and taken into account?

**Susceptibility for climate change:** The change of the future weather in terms of temperature, solar radiation, wind, humidity and precipitation will influence the moisture safety, thermal comfort and energy demand. Is the air tightness, solar shading, moisture risk levels, etc. still sufficient and acceptable?

## 5. Changes in temperature and relative humidity due to the design

One important effect of increased thermal insulation levels of the building envelope is that during the heating season, the exterior facing parts will be both colder and thicker. The heat losses are minimized and do not contribute very much in the elevation of temperatures of the exterior parts, in comparison to the exterior conditions.

The local humidity by volume supply  $\Delta v$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), in the building envelope parts, due to diffusion, convection and leakage, is also an important factor for the relative humidity. In the interior spaces of the building it is equal to the ordinary indoor moisture supply. However, locally in the building envelope it might vary.

$$RH = \frac{v_e + \Delta v}{v_s(T)} \quad (1)$$

where  $RH$  = Relative humidity (-)  
 $v_e$  = Exterior humidity by volume ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\Delta v$  = Local moisture supply ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $v_s$  = Humidity by volume at saturation ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

The formula clearly shows that one part, the outdoor humidity by volume, is something that we cannot change by the design of the building; it only depends on the climate and weather. The local moisture supply can be controlled by applying an air tight interior building envelope not allowing for moisture convection. Also diffusion from the interior should be minimized in order to reduce the supply. Rain leakage and moisture convection from the exterior air or air that has picked up moisture from wet surfaces in the near surrounding such as the exterior cladding will increase the local moisture supply. The local temperature, which is directly dependent on the building design, will strongly influence the denominator and hence the relative humidity.

We will illustrate the changes in temperature due to the design of the building envelope. The increase of the surface temperature,  $\Delta T$ , in comparison with the exterior one is:

$$\Delta T = U(T_i - T_e) \cdot R_{se} \quad (2)$$

where  $U$  = U-value of the envelope part ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )  
 $T_i$  = Interior temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_e$  = Exterior temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $R_{se}$  = Exterior surface resistance ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

Typical value of the exterior surface resistance is  $0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . For a U-value of  $0,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  and a temperature difference of  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the temperature difference is  $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . If the wind exposure is less this temperature difference will be higher. For a U-value of  $0,25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , the increment of the surface temperature will be halved.

If we are looking at a case with an external cladding or insulation board and we want to estimate the temperature difference from the exterior to the point of interest for different U-values, the differences will be increase. For a cladding with a thermal resistance of  $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  the temperature drop between a point behind the cladding and the exterior will approximately be equal to  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  for a U-value of  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  and  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  for a U-value of  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Here, we have used (2) but exchanged the surface resistance by the thermal resistance of the cladding. In the less insulated envelope the temperature behind the cladding is  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  warmer.

A non-dimensional temperature,  $\xi$  (-), can be introduced which is handy to use since it does not depend on the value of the interior and exterior temperature. It is calculated using steady-state conditions and an interior temperature of one and a zero exterior temperature. The actual local temperature, using  $\xi$  becomes:

$$T = T_e + \xi \cdot (T_i - T_e) \quad (3)$$

The  $\xi$ -value can be calculated for any point in a building structure, even ventilated spaces and cavities with fixed ventilation rates. This method is applicable to average situations such as monthly averages. However, it does not take dynamic effects into account.

Combining (1) and (3) we get:

$$RH = \frac{v_e + \Delta v}{v_s (T_e + \xi \cdot (T_i - T_e))} \quad (4)$$

The formula will be used below in order to analyse effects on the relative humidity du to the seasonal (monthly) changes in the weather.

## 6. Moisture safety and mould growth

A fundamental uncertainty lies in how to evaluate the calculation results for the temperature and the relative humidity. What we really want to do is to estimate the probability or risk for mould growth in a building structure. There are several studies on this subject, for instance Adan [5]. However, there is no standardised or widely accepted method for the evaluation of the mould growth risk. Here, we will base the risk on the method developed by Viitanen [6] and Hukka & Viitanen [7]. He introduces mould index, in a scale from 0 to 6, where 0 means no growth of mould and 6 means very heavy and tight growth.

The critical relative humidity for mould growth to start according to [7]:

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, & T \leq 20^\circ\text{C} \\ 80\%, & T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

Higher value of the relative humidity and temperature, in certain ranges, and longer durations accelerates the development of mould.

Using (4) and (5) we can illustrate mould risk such as in Figures 1-4. For a given structure, with the  $\xi$ -value in the range of zero to one, an assumed local moisture supply and a given climate (monthly averages), the risk, alternatively safety margins are found.

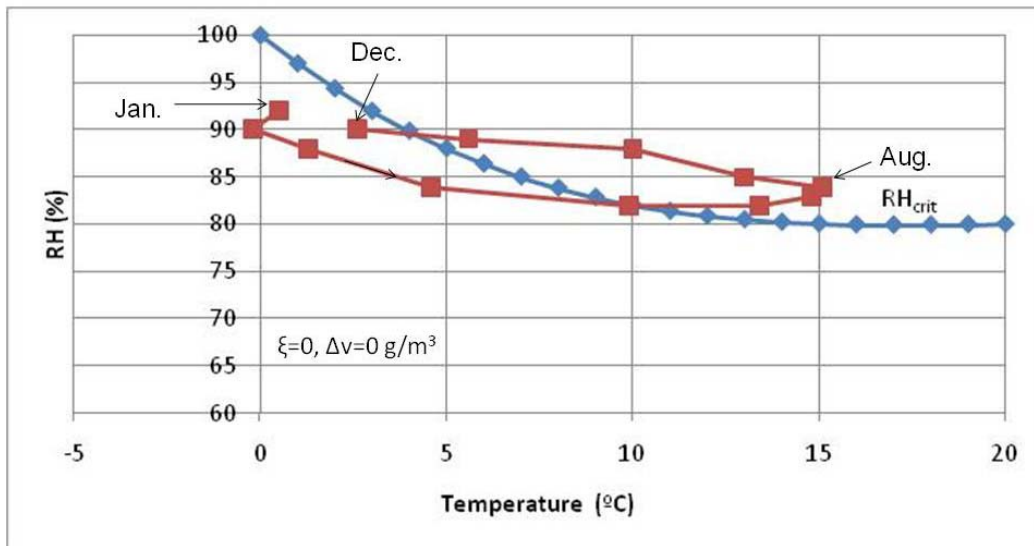


Figure 1. Relative humidity in the building envelope in Göteborg for all the months of the year; for a  $\xi$ -value of 0 (exterior air temperature) and local moisture supply of  $0 \text{ g/m}^3$ , compared with the critical relative humidity.

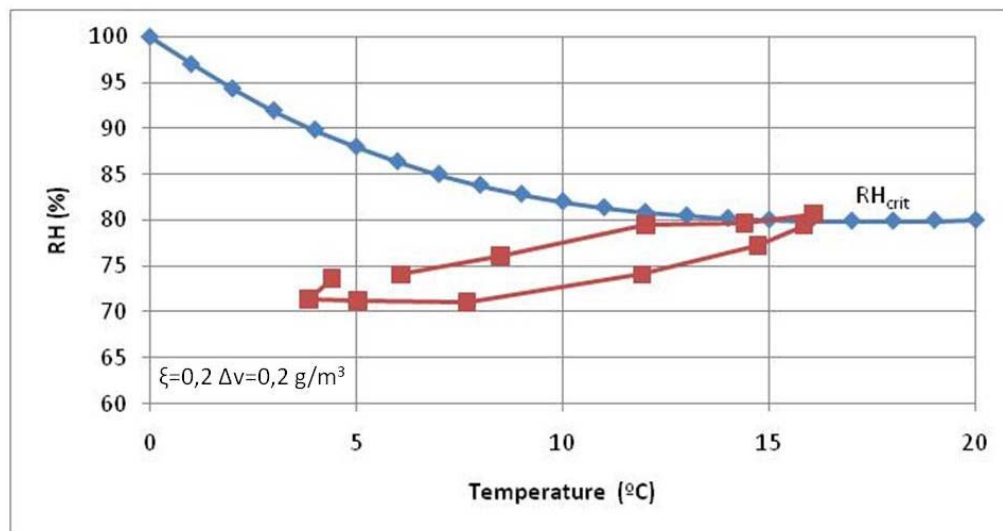


Figure 2. Relative humidity in the building envelope in Göteborg for all the months of the year; for a  $\xi$ -value of 0,2 and local moisture supply of  $0,2 \text{ g/m}^3$ , compared with the critical relative humidity.

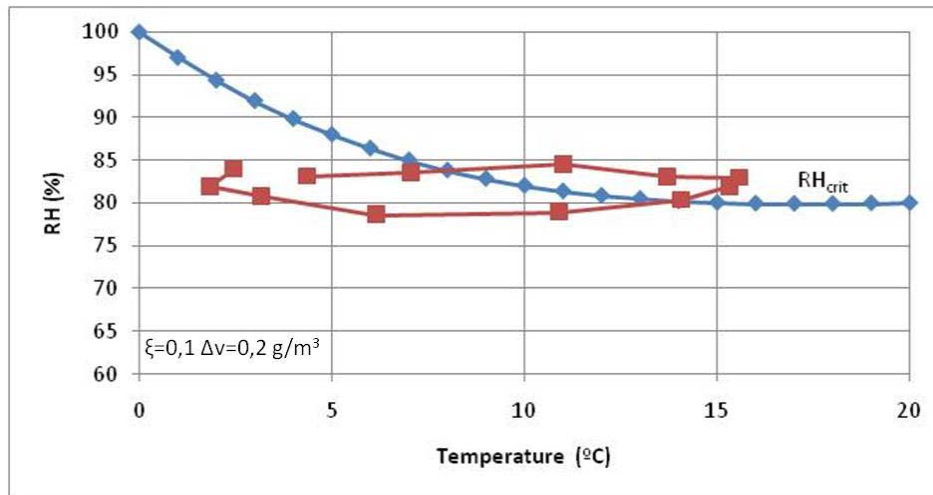


Figure 3. Relative humidity in the building envelope in Göteborg for all the months of the year, for a  $\xi$ -value of 0,1 and local moisture supply of 0,2 g/m<sup>3</sup>, compared with the critical relative humidity.

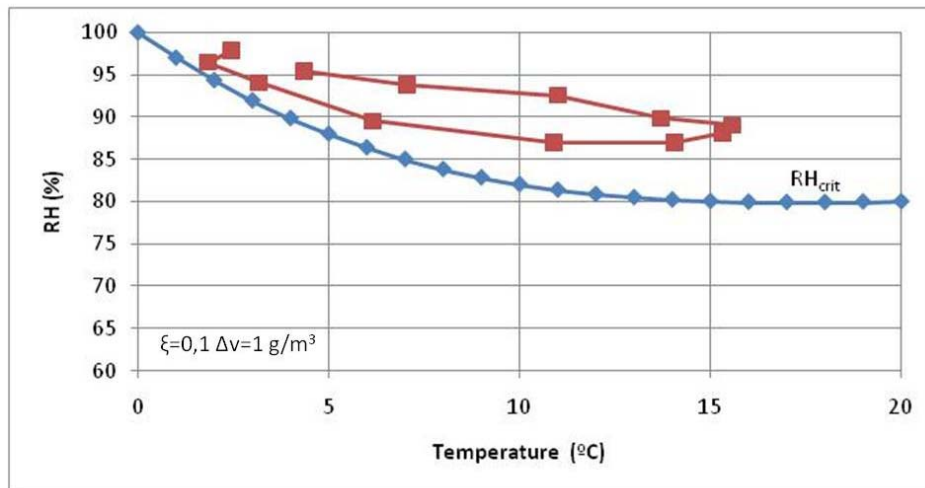


Figure 4. Relative humidity in the building envelope in Göteborg for all the months of the year, for a  $\xi$ -value of 0,1 and local moisture supply of 1 g/m<sup>3</sup>, compared with the critical relative humidity.

It is clear that the mould growth risk is highest during the summer and autumn months, even for structures exposed to pure outdoor air. Higher  $\xi$ -values, were it is warmer such as positions in the structure closer to the interior, reduce the risk. Elevated local moisture supplies increases the risk.

As an alternative method to illustrate the mould risk, a mould growth potential  $m$  is introduced, which is simply the relative humidity divided by the critical relative humidity for mould growth (6). Theoretically, mould growth is possible only when  $m > 1$ . Hence, the development over time of  $m$  may be used illustrate the development of the mould risk.

$$m = \frac{RH}{RH_{crit}} \quad (6)$$

Figure 5 shows the mould growth potential over the year for the case previously shown in Figure 3 ( $\xi=0,1$ ,  $\Delta= 0,2 \text{ g/m}^3$ ). Once again it is obvious that the months July to October (months 7-10) are the most risky ones.

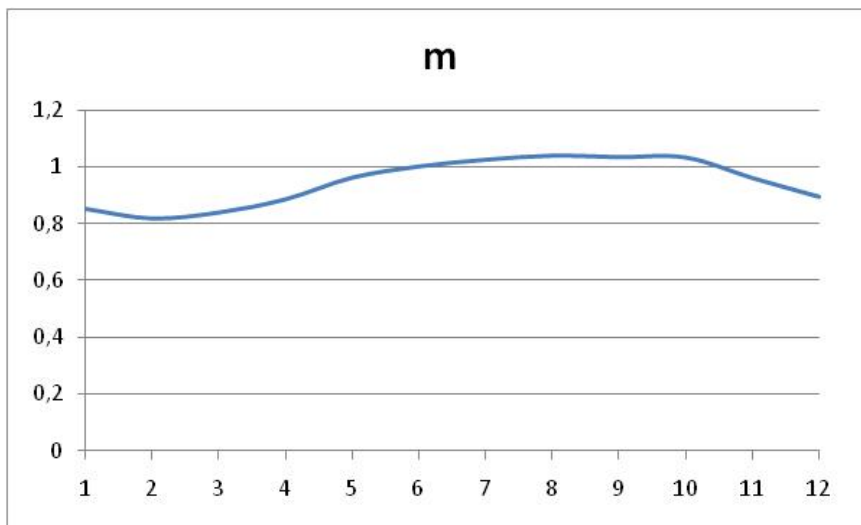


Figure 5. Mould growth potential for all the months of the year in Göteborg, for a  $\xi$ -value of 0,1 and local moisture supply of  $0,2 \text{ g/m}^3$ .

## 7. Results and discussions

When changing the building design of new buildings or changing existing ones the up-coming risk should be evaluated. A number of risk situations are outlined for low-energy buildings and a simple procedure for mould growth analyses is shown.

It is obvious that increased thermal insulation can lead to a higher relative humidity and the sensitivity for local moisture supplies becomes more severe.

The presented mould growth analysis, does not consider dynamic effects such as condensation, drying up processes (e.g. occasional leakage), thermal mass of ground structures, etc. which of course complicates things further. However, the presented analyses form a good base to estimate expected long term average behavior.

However, the question concerning the danger with mould growth for indoor air quality, durability and capital cost must be considered as well. This is not discussed in detail in this paper.

## 8. Summary

Risk of performance failure exists both for old and new buildings. Changes in building design such as the use of low-energy building technology give rise to new possible risks. A number of risks are outlined in the paper, these are associated with; Thermal comfort, indoor environment, moisture safety, energy demand, user behaviour, frost susceptibility, durability. All these risks should be studied more in detailed.

A simplified method for risk assessment coupled to moisture conditions and mould growth is presented. It indicates that increased thermal insulation can lead to a higher relative humidity and an increased sensitivity for local moisture supplies.

## References

- [1] Ahrens C., Borglund E., 2007. Fukt på kallvindar – En kartläggning av småhus i Västra Götalands län, Examensarbete 2007:11, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola. (In Swedish)
- [2] Sasic Kalagasidis A., Mattsson, B. Modelling of Moisture Conditions in a Cold Attic Space. 26<sup>th</sup> AIVC conference, 2005, Brussels, Belgium.
- [3] Få bukt med fukt, Samuelson, Arfvidsson, Hagentoft 2007. Rapport T3:2007, Formas, Stockholm. (In Swedish)
- [4] Sikander E. et al 2009. Lågenergihus och passivhus – vanliga frågeställningar. SP Rapport 2009:28 (In Swedish)
- [5] Adan O.C.G 1994. On the fungal defacement of interior finishes. Ph.d thesis, Technical University of Eindhoven.
- [6] Viitanen H.A., 2001. Factors affecting mould growth on kiln dried wood. VTT Finland
- [7] Hukka E., Viitanen H.A., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33, Springer-Verlag.



## **2. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus**



## Rakennusfysikaalinen suunnittelu vaativassa kerrostalokohteessa

Toni Tuomola  
Skanska Talonrakennus Oy - Kodit

### Tiivistelmä

Ratinanrannan asuintalot ja parkkihalli on rakennettu rakennusfysiikan kannalta vaativaan paikkaan. Alueen viistosaderasitus on huomattava ja rakenteiden ulottuminen järven pintaan asti tuovat omat haasteensa rakennus- ja rakennesuunnitteluun. Kolmannen osapuolen suunnitelmien tarkastuksella saatiin vaativassa asuinkerrostalokohteessa hiottua yhdessä kohteen suunnittelijoiden kanssa laadukkaat toteutus suunnitelmat rakennusryhmän aikaansaamiseksi ja elinkaaritavoitteiden täyttämiseksi.



Kuva 1. Ratinanranta lounaasta katsottuna. Skanskan talot etualalla oikealla.

## 1. Johdanto

Skanska voitti vuonna 2006 Tampereen kaupungin tontinluovutuskilpailun Ratinanrannan asuintalotonteista. Ratinanranta on vanhaa täyttömaa-aluetta muinaisen soraharjun kupeessa Tampereen keskustan eteläpuolella Pyhäjärven rannassa. Etelärantana paikka on altis järven tuulille, joten viistosateet ja lumituiskut olivat tiedossa oleva haaste rakennussuunnittelulle. Louhikkoinen täyttömaa ja alimpien lattiatasojen sijaitseminen lähellä järven pinnan tasoa toivat taasen haasteita pohjasuunnitteluun.

Ratinanranta on arkkitehtuurikilpailun tulos ja alueen suunnittelua ohjaavat rakennustapaohjeet osaltaan vaikuttivat lähtötilanteen haasteellisuuteen: terassoitua rakennusmassa, paikalla muuratut julkisivut, maanalainen pysäköinti ja viherrakenteet kannen päällä olivat vain eräitä ratkottavia ongelmakohtia. Piha-alueiden korkomaailma oli asemakaavoituksessa sidottu tiettyyn korkoon, joka omalta osaltaan rajoitti liikkumavapauksia.

Aiempien vastaavien kohteiden kokemuksen perusteella suunnittelussa päädyttiin heti alkuvaiheessa teettämään rakennusfysikaalinen tarkastelu kolmannella osapuolella kohteen suunnitelmista niin lämmön, kosteuden kuin äänenkin osalta. Rakenteiden mekaniikan osalta alueen rakennukset ovat tavanomaisia, nykyasuntotuotantoa vastaavia, joten niiden osalta ei katsottu tarvittavan erityismenettelyä.

Suunnitelmien tarkastaminen tehtiin pääpiirustusvaiheessa asuintalosta Ratinanrannan Aallotar ja Ratinanrannan Pysäköinti Oy:n rakenteista. Tässä suunnitteluvaiheessa oli päämassat ratkottu, mutta detaljisuunnittelu oli tekemättä, joten suunnitteluratkaisuihin voitiin vielä suurelta osin vaikuttaa.

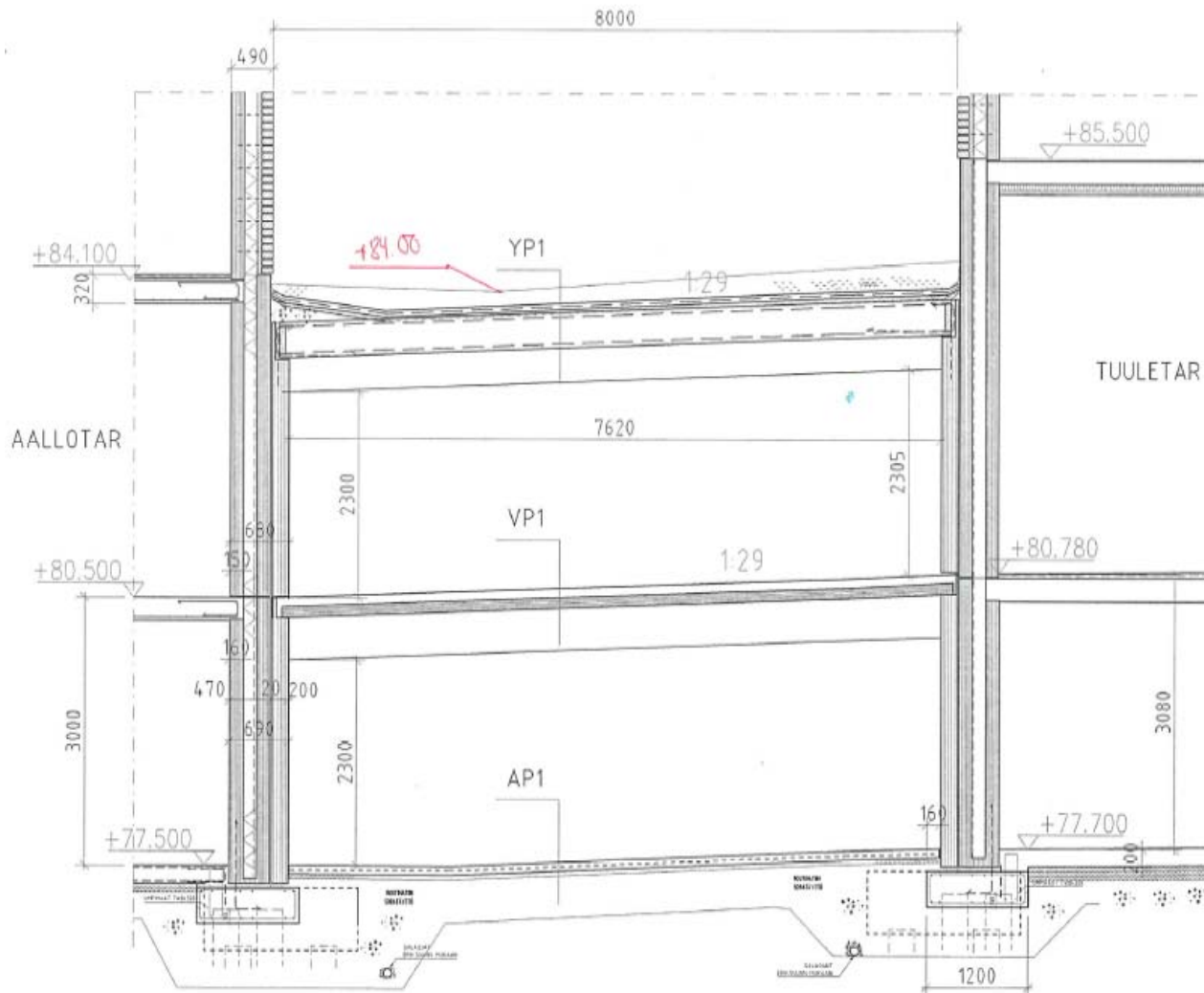
Suunnitelmien tarkastuksen suoritti lämpö- ja kosteustekniikan osalta Tampereen teknillisen yliopiston Rakennetekniikan laitos [1] ja äänitekniikan osalta Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy [2].

## 2. Ratinanrannan Pysäköinti Oy

Pysäköintihalli on kaksikerroksinen maanalainen rakennus, jonka päälle rakennettiin piha-alueet ja aluetta halkova Ratinankatu. Asemakaavassa Ratinankadun koroksi oli määrätty +84.00 ja alapuolella oleva Pyhäjärven normivedenpinta on +77.20, joten pysäköintihallin pystysuuntainen mitoitus oli näin ollen lukittu.

Pysäköintihallin runko tehtiin pilari-palkki rakenteena, jossa ylempi holvi (yläpohja) on ontelolaattaa ja välipohja kuorilaatta. Rakenteeseen päädyttiin korkeuden ja parkkihallirakennuksen muodon johdosta. Parkkihalli liittyy suoraan viereisiin asuintaloihin, jotka eivät ole suorassa kulmassa toisiinsa nähden. Näin ollen jännitetty rakenne ei olisi työtekniisesti ollut järkevä useiden jälkivalukaistojen johdosta.

Seuraavassa on esitetty asioita, joita ratkottiin rakennusfysiikan tarkastelussa.



Kuva 2. Ratinankadun poikkileikkaus.

## 2.1 Parkin rakenneratkaisut

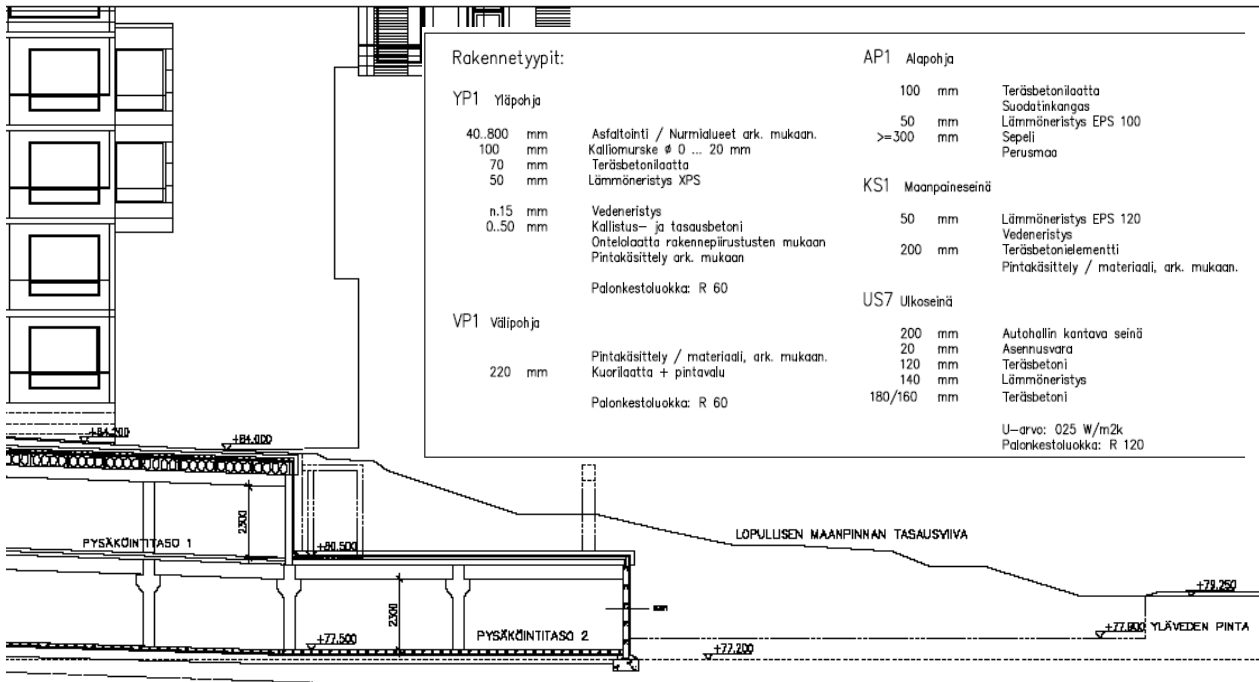
Parkin anturat sijaitsevat osittain veden pinnan alapuolella. Veden nousua rakenteisiin rajoitetaan bitumikapillaarikatkoin. Koko rakennus on perustettu keskimäärin 21 metrisin betonipaaluin. Parkin lattia tehtiin kuitenkin maanvaraisena, koska mahdollinen painuma todettiin niin pieneksi, että siitä ei ole haittaa. Maanvarainen lattiarakenne tehtiin kuitenkin kuitubetonilattiana kutistumahalkeilun välttämiseksi.

Rakennuspohjan kuivatusta varten kohteessa on perusvesipumppaamot. Mikäli jossain tilanteessa tulvavesi pääsisi parkkihalliin sisään esimerkiksi Pyhäjärven vedenpinnan noustessa, voitaisiin perusvesipumppuilla tyhjentää halli vedestä, mutta ei estää sen nousua halliin. Halliin veden nousemisen estävä pumppaamo olisi ollut ylimitoitettu tulvariskiä nähden, koska asuinkerrostalot ovat joka tapauksessa parkkihallia ylempänä ja Pyhäjärvi on kuitenkin säännöteltty järviallas.

Johtuen matalista rakennevahvuuksista ja ohuista lämmöneristeistä kylmien ja lämpimien alueiden rajoilla rakenteiden liikkeet muodostuvat jossain tapauksissa suuriksi. Liitoskohdissa

vedeneristeiden liikuntavara varmistettiin muun muassa riittävän korkeilla nostoilla, joiden jälkeen vedeneriste vasta liitettiin muihin rakenteisiin. Vedeneristeiden joustovara varmistettiin myös riittävän isoilla irrotuskaistoilla, joilla bitumikermit saatiin irti betonirakenteista.

Pihakannen päälle tulevien viher- ja katurakenteiden rakennekerrosten suunnittelu oli yksi haastavimmista osa-alueista. Johtuen tiukasta korkomaailmasta pihakannen päällä, koko kansialue talojen väleissä salaojitettiin ja lisättiin kaivoja mahdollisten tulvatilanteiden varalta.



Kuva 3. Ratinanrannan talojen korko suhteessa Pyhäjärveen.

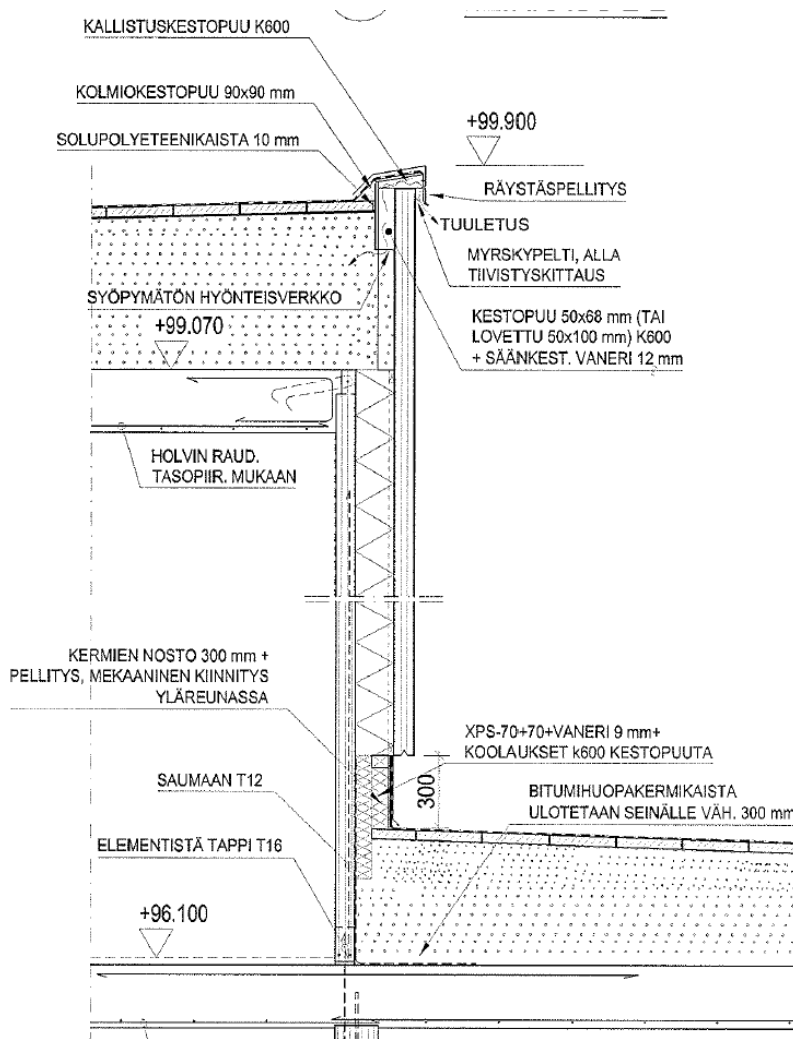
### 3. Asunto Oy Tampereen Ratinanrannan Aallotar

Aallotar on viisikerroksinen asuinkerrostalo, jossa ylin kerros on terassoituva. Rungossa pystyosat ovat betonielementtejä ja holvit 260 mm paikallavaluholveja. Vesikatto on bitumikermipintainen lecasoratasakatto. Julkisivut ovat paikallamuurattua tiiltä, peltikasettia ja sandwich elementtiä, joten liitospaikkoja eri rakennemateriaalien välillä on runsaasti. Osa parvekkeista on sisäänvedettyjä terasseja, joiden alla on lämmin tila.

Aallottaren lisäksi alueelle toteutetaan yhteensä neljä samantyyppistä asuinkerrostaloa samoilla suunnitelmaratkaisuilla.

#### 3.1 Aallottaren rakenneratkaisut: kosteus&lämpö

Suurimmaksi kosteusriskipaikaksi todettiin viistosaderasitukselle alttiit julkisivun osat. Vesikaton ja julkisivun liittymiskohdissa sekä eri materiaalien rajapinnoissa varmistettiin vedeneristeiden jatkuminen ja tuuletuksen toiminta. Jossain kohdissa myös eristetään mahdollisesti pääsevän veden poispääsyreitit varmistettiin liitosdetaljien rakentamisjärjestystä muuttamalla, jolloin tuulettavuus parani.



Kuva 4. Vesikattoleikkaus Aallotar.

Vivahteikas julkisivu, jossa ikkuna-aukkojen paikat vaihtelevat, vaativat myös osaltaan tarkastelua lämpöliikkeiden aiheuttamien jännitysten hallitsemiseksi julkisivun arkkitehtuuria pilaamatta.

Lähtötilanneanalyysin perusteella Aallottaren tarkastelussa suurin työ kohdistui ulkovaipan rakenteisiin. Alueen ensimmäisessä talossa Aallottaressa tehty tarkka työ kannatti, koska tehtyjä ratkaisuja voidaan hyödyntää nyt alueen jatkokohteissa.

### 3.2 Aallottaren rakenneratkaisut: ääni

Kohteen suunnittelun alkuvaiheessa pohdittiin lattialämmitysratkaisua talon lämmönjakomuodoksi. Suunnitteluvaiheessa tuli kuitenkin esille, että suunniteltu ratkaisu (paikallavaluholvi+eristekerros+plaanokerros, jossa lämpöputket) saattaa joissain tilaratkaisuissa aiheuttaa liian suuren askelääniefektin huoneistosta toiseen. Aallottaren asuntojakaumassa on useita avaran tilan omaavia asuntoja, joten asiantuntijalausuntojen [2] perusteella lämmönjakomuodoksi valittiin lämpöpatterit. Ratkaisuun oli helppo siirtyä siksikin, että jo aiemmin ikkunoiden korot oli valittu siten, että kaikkien ikkunoiden alla oli betoniseinää eli tarvittava tila pattereille.

### 3.3 Aallottaren rakenneratkaisut: energia

Skanska on linjannut vuoden 2009 alussa, että kaikki uudet asuinrakennukset rakennetaan A tai B –energialuokkaan. Tavoitteeseen pääsemiseksi yksi avaintekijä on rakennusten ilmatiiveys. Skanska on vuoden 2009 aikana teettänyt kuuden asuinkerrostalon mittaussarjan, jossa Ratinanrannan Aallotar on yhtenä talona. Mittaus suoritettiin talon viimeistelyvaiheessa kesäkuussa 2009 ja tulokseksi saatiin ilmanvuotoluku  $n_{50}=0.9$  l/h.

Talo on suunniteltu nykynormien mukaisesti paitsi ikkunoiden osalta. Ikkunoissa on käytetty ns. superlasia liiallisen lämpösäteilyn estämiseksi ja jäähdytystarpeen vähentämiseksi. Superlasin U-arvo on 1.1. Näillä rakenneratkaisuilla ja pienellä ilmanvuotoluvulla saadaan talon energialuokaksi B. Vuotolukua voidaan pienentää vielä huomattavasti työtekniikkaa kehittämällä. Rakentamisvaiheessa tiivistykset tehtiin ovissa ja ikkunoissa uretaanisaumauksella. Käyttämällä kriittisissä kohdissa lisäksi saumausmassoja ja tiivistysteippauksia, saadaan ilmanvuotoa pienennettyä vielä lisää.



Kuva 5. Ratinanranta järveltä. Julkisivussa on useita materiaaleja ja erikoisparvekkeita sekä terasseja.

## 4. Yhteenveto

Vaativissa asuinkerrostalokohteissa on hyödyllistä käyttää kolmannen osapuolen suunnitelmien tarkastusta. Vaikka suunnittelijatiimi olisikin kokenut, on rakentaminen lukuisine normeineen ja sääntöinen alati muuttuva ala, jossa ulkopuolinen idea tai kritiikki voi olla ratkaiseva tekijä hyvän suunnitteluratkaisun tuottamisessa. Rakentaminen on myös aina sidoksissa paikkaan ja joka kohteessa on ominaispiirteensä jo pelkästään sääolosuhteista johtuen. Rakennusfysiikan



suunnittelun panostamiseen asuinrakentamisessa saamme entistä terveempiä taloja asua ja entistä pitkäikäisempi rakenteita huoltaa ja ylläpitää.

## **Lähdeluettelo**

- [1] Pentti, M.; Mattila, J.; Lahdensivu J. 2007. Ratinan Parkki ja Asoy Tampereen Ratinan Aallotar, rakennepiirustukset. TTY Rakennetekniikan laitos.
- [2] Kylliäinen, M. 2007. Lausunto AsOy Tampereen Ratinan Aallotar. Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy.



# Maanvastaisten rakenteiden salaojittava lämmöneristäminen

Mikko Aalto<sup>1</sup> ja Osmo Semberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Muottikolmio Oy

<sup>2</sup> Draintech Oy

## Tiivistelmä

Lämpimien tilojen maanvastaisten rakenteiden oikeat kosteustekniset ominaisuudet ovat välttämätön edellytys rakenteiden kuivana pysymiselle. Oikeantyyppisellä lämmön- ja vedeneristyksellä saadaan kosteus liikkumaan rakenteessa oikeaan suuntaan. Maanvastaisissa rakenteissa on oleellista järjestää lämmöneristys niin, että kastepiste ei pääse muodostumaan kohtaan, jossa se ajan myötä aiheuttaa ongelmia. Salaojittavalla, vapaasti vesihöyryn lävitseen päästävällä, lämmöneristeellä saadaan lämpimien tilojen maanvastaisten rakenteiden harveneminen lämpimästä kylmään varmistettua.

## 1. Johdanto

Niin sanottujen sairaiden talojen ongelma on usein lähtöisin rakennusten rakenteiden liian korkeasta kosteuspitoisuudesta. Kosteus on osaksi peräisin maaperästä, osin huoneilmasta, sekä kesäisin myös ulkoilmasta. Usein kiinteistönomistajat luulevat kosteusongelmien olevan peräisin salaojituksen toimintahäiriöistä. Salaojitus oikein tehtynäkin on vain yksi, joskin tärkeä, osa vaadittavasta rakennusperustan kosteussuojauksen kokonaisuudesta. Kosteus on yleensä lähtöisin maaperästä perustan alta, sekä sisätilojen asumiseen liittyvistä toiminnoista. Rakennusperustan ulkopuoliseen kosteussuojaukseen liittyvät tavat osaltaan luoneet myytin, jonka mukaan rakennusperustan kuivuminen tapahtuu hitaasti - mikä sellaisenaan on totta, jos perustojen pinnat tehdään liian tiiviiksi. Tämä estää rakenteiden hengittämisen ja sitä kautta niiden kuivumisen. Varsinkin jos käytetään lisäksi väärää lämmöneristystekniikkaa. Perustan ulkopuolinen, hengittävä lämmöneristys luo edellytykset perustan nopealle kuivumiselle perustan valamisen/muurauksen ja jopa vesivahinkojen jälkeen.

## 2. Lämpimien tilojen maanvastaisten rakenteiden kuivana pitäminen

Kosteus vaeltaa luonnollisesti korkean höyrynpaineen tilasta alhaisempaa höyrynpainetta päin. Kun maaperä perusmuurin ulkopuolella ja lattialaatan alla on viileä, on höyrynpaine alhainen. Tällöin sisällä oleva korkeampi höyrynpaine purkautuu luonnollisesti ympäröivää viileää maata päin. Maa-ainesta tässä tarkoituksessa voidaan perustellusti pitää eräänlaisena jättiläiskuivurina.

Lämmöneristys tulee asentaa perusmuurin ulkopuolelle ja maanvaraisten lattioiden alle. Tällöin perusmuurit ja lattiat saadaan pysymään kuivina. Samalla lämmitysenergia sitoutuu massiiviseen rakennusperustaan, joka puolestaan antaa hyvän, vedottoman ja viihtyisän huoneilman sekä pienemmän vuotuisen lämmityslaskun.

Rakennusperustan pitää saada kuivua valun/muurauksen, ja mahdollisen vesivahingon jälkeen nopeasti. Huoneilman lisääntyneen kosteuden pitää pystyä poistumaan nopeasti hengittävien seinä- ja lattiarakenteiden läpi. Rakennusperustan ja lattialaatan ulkopuolinen lämmöneristys

mahdollistaa kosteuden nopean siirtymisen maaperään, kunhan käytetään vettymätöntä, vapaasti vesihöyryn lävitseen päästävää lämmöneristettä.

Kosteaa tai märkää lämmöneriste aiheuttaa korkean höyrypaineen eristeessä, joka vaikeuttaa tai estää höyrypaineen purkautumista maaperään. Kuivalla ja diffuusioavoimella lämmöneristeellä on alhainen höyrynpaine ja siten se mahdollistaa kosteuden nopean siirtymisen ("hengittämisen") maaperään. Hengittävän lämmöneristeen tulee siis olla myös vettymätön.

Vesi ei saa päästä kosketuksiin rakennusperustan arkojen rakenteiden kanssa, kuten perusmuurit, anturat ja lattialaatat. Siksi salaojituskerros on tehtävä huolella koko perusmuurin ympärille ja lattialaatan alle. Kuivatuskapasiteetti mitoitetaan sellaiseksi, että salaojarakenne kaikissa tilanteissa estää rakenteiden ja perustan kastumisen.

Rakenna tehokas, sekä vaaka- että pystysuuntaisen kapillaarisen kosteuden siirtymisen ehkäisevä rakenne perusmuurin ympärille, sekä anturan ja lattialaatan alle. Kapillaarisuus kuljettaa kosteutta tehokkaasti pitkiäkin matkoja, jopa höyrynpaineen luontaista suuntaa vastaan.

Perusvesien määrä ja taso pyrkii nousemaan tavallisesti lumen sulamisen ja pitkäaikaisten sateiden yhteydessä. Näiden vesien kontakti perustan rakenteisiin tulee estää. Perusvedet johdetaan pois oikein tehdyllä salaojituksella. Kattovedet johdetaan pois perustan välittömästä läheisyydestä.

Tehokas kosteussuojaukokonaisuus muodostuu täten ulkopuolisesta lämmöneristyksestä, rakenteiden hengittämisen- ja kuivumismahdollisuudesta, kapillaarisen kosteuden katkaisusta sekä salaojarakenteesta kokonaisuutena.

### **3. Salaojitus**

Tämä koostuu kahdesta päätekijästä; salaojaputkistosta, joka sisältää tarvittavat huolto- ja tarkastuselementit sekä salaojittavasta rakennekerroksesta perusmuurin ulkopuolella, anturan ja lattialaatan alla.

#### **3.1 Salaojaputket**

Salaojaputket johtavat perustasta tulevat perusvedet purkupaikkaan. Sen vuoksi putkisto on asennettava perustan arkoja rakenteita syvemmälle. Salaojaputkiston tulee olla myös lämmöneristuksen ja salaojituskerroksen alapuolella, jotta perusvedet pääsevät purkautumaan vapaasti salaojituskerroksesta salaojaputkeen. Salaojaputken vesijuoksun tulee olla järjestelmän ylimmässä kohdassa vähintään 15 cm anturan alapuolella ja vähintään 40 cm rakennuksen alimman lattiatason alapuolella.

Järjestelmään tulee asentaa riittävä määrä tarkastus- ja huoltoelementtejä kaivojen, ja / tai tarkastus- ja huoltoputkien muodossa. Näiden kautta voidaan tehdä pienellä vaivalla riittävät havainnot järjestelmän kuivatustasosta, toiminnan tilasta ja mahdollisten huoltotoimenpiteiden tarpeesta, sekä huoltotoimenpiteet.

Salaojaputkena tulee käyttää ainoastaan ns. tuplasalaojaputkea, jolla on sileä puhtaana pysyvä sisäpinta ja korrugoitu ulkokuori. Ko. putkilla on hyvä vedenotto- ja johtokyky ja pituusjäykkillä putkilla vältetään myös yleiset salaojaputkien asennusvirheet.

Salaojavesiä ei saa johtaa jätevesiviemäriin. Syynä tähän on muutoin perustaan muodostuvat hajuhaitat sekä jätevesipuhdistamoiden "puhtaista" vesistä johtuva puhdistuskapasiteetin heikentyminen. Salaojavedet voidaan purkaa rakennuspaikkaa alavampaan maastonkohtaan, sadevesiviemäriin, salaoja- tai sadevesien imeytyspesään. Vaikeimmassa tapauksessa salaojavedet joudutaan siirtämään rakennusperustasta pumppaamalla. Pumppaus edellyttää pumpulta varmatoimisuutta sekä jatkuvaa valvontaa.

### 3.2 Salaojituskerros

Salaojakerros perusmuurin ympärillä johtaa sade- ja sulamisvedet salaojituskerroksen kautta ja läpi niin ettei vedet pääse kastelemaan perustan rakenteita. Salaojituskerros voidaan tehdä salaojasoralla, singelillä, pestyllä murskeella tai salaojittavalla lämmöneristyslevyllä. On hyvä kuitenkin muistaa, että kiviainespohjainen salaojituskerros ei omaa lämmöneristysominaisuuksia ja estää vesihöyryn pääsyn ympäröivään maaperään. Salaojittava kerros tarvitaan myös lattialaatan alla, jotta saadaan katkaistua myös kapillaarisen kosteuden nousu rakenteisiin. Salaojakerros perusmuurin ympärillä tulee ympäröidä suodatinkankaalla ennen kaivannon täyttöä. Täten estetään tehokkaasti salaojarakenteen tukkeutuminen hienojakoisilla maaineksilla.

Viimeisten 30 vuoden aikana on salaojittavien lämmöneristyslevyjen käyttö lisääntynyt runsaasti mm. Ruotsissa. Käytännön kokemuksia ratkaisuista on jo n. 40 vuoden ajalta ja kokemukset ovat olleet erittäin hyviä. Yhtenä syynä ratkaisumallin yleistymiseen on ollut keveiden eristelevyjen helppo asennettavuus, verrattuna raskaisiin kiviaineksiin. Saneerauskohteissa voidaan lisäksi kaivannosta kaivetut hienojakoiset maamassat hyödyntää uudestaan kaivannon täyttöön. Massojen käsittely jää tällöin kokonaisuutena vähäiseksi ja voidaan turvata kosteuden nopea siirtyminen suoraan ympäröivään maaperään.

Kellariseinien kastumisen minimoimiseksi tulee valita ratkaisu, jolla salaojituskapasiteetti on mahdollisimman suuri. Bitumi-lateksiemulsiolla liimatut, tasakokoiset solumuovipallot levyksi puristettuna, omaavat parhaat toimintaedellytykset suuren huokostilavuuden ansiosta. Kyseisessä ratkaisussa salaojitusteho on runsaasti ylimitoitettu. Ominaisuus on kuitenkin erittäin tärkeä ja sen tärkeys korostuu, kun levyn asentamisen lisäksi perustasta poistetaan ennen levyn asentamista tiiviit rakenteet mm. pikeys ja perusmuurilevyt. Tällöin saadaan aikaan kunnollinen ja nopea perustan kuivuminen.

Maanvaraisen laatan osalta vaatimukset ovat samat kuin perusmuurilla. Toisinsanoen molemmat tarvitaan sekä laatan alainen vaakataso salaojituskerros että lämmöneristys. Salaojittavasta lämmöneristeestä on tullut varteenotettava vaihtoehto perinteisiin ratkaisuihin verrattuna, johtuen yksinkertaisesta asennustyöstä ja rakenteiden nopeasta kuivumisesta. Kokonaiskustannukset jäävät tavallisesti alhaisemmiksi verrattuna muihin eristysratkaisuihin, koska erillistä salaojituskerrosta ei tarvitse rakentaa. Lisäksi ratkaisu toimii myös pitkällä aikavälillä, kun vettymätön eriste pysyy kuivana.

## 4. Lämmöneristys ja kuivuminen

Asuin- ja oleskelutilat, jotka rakennetaan maanpinnantason alapuolelle ja/tai laatalle, tulee lämpöeristää perusmuurin ulkopuolelta ja laatan alta, aina kun kosteusuojauksesta halutaan tehokas ja varmatoiminen. Lämpöeristetyt perusmuurit ja lattialaatat ovat tällöin lämpöisiä ja niitä ympäröivä perus- ja täyttömaat säilyvät viileinä. Viileässä perusmaassahan on alhainen

höyrypaine kun sitä vastoin lämpimissä perustan rakenteissa vesihöyrynpaine on korkea. Kosteuden kulku ohjautuu täten lämpimästä ulos viileää perusmaata päin, jolloin tapahtuu myös rakenteiden kuivuminen. Kosteus kondensoituu vedeksi kylmässä pinnassa, eristeen ulkopuolella ja ohjautuu pystysalaojarakennetta pitkin salaojaan.

Tiiviitä perusmuurin ulkopuolisia rakenteita, jotka estävät kosteuden siirtymisen tulee ehdottomasti välttää. Näitä ratkaisuja käytettäessä voi rakenteiden kuivuminen vaikeutua huomattavasti ja jopa estyä. Pelkkä perusmuurin lämpötilan nosto sellaisenaan saattaa olla riittämätön toimenpide rakenteen kuivattamiseksi. Yhdistelmä, jossa tiiviit rakenteet on poistettu ja perusta on oikein lämmöneristetty, aikaansaa tehokkaan kuivatuksen ja antaa parhaan toimintavarmuuden ja lopputuloksen.

Yksinkertaisimmillaan asioita voidaan verrata toisiinsa kuten kumi- ja nahkasaapasta, jotka kumpikin luovat jaloillemme erilaisen olotilan. Kumisaapas aiheuttaa kosteuden kondensoitumisen, kun nahkasaapas taas hengittää pysyen kuivana ja miellyttävänä jalalle. Jalan aiheuttama korkea höyrypaine aiheuttaa "hikoamisilmion" kumisaappaassa. Aivan samalla periaatteella toimii kosteus myös rakennusperustassa. Sellaisen lämmöneristeen, joka imee ja sitoo itseensä kosteutta ja jolla on jatkuvasti korkea kosteuspitoisuus, käyttöä eristeenä tulee ehdottomasti välttää.

Vesihöyryn paine kosteassa lämmöneristeessä on ja pysyy korkeana ja siten estää kosteuden siirtymisen maaperään tai aiheuttaa puolestaan kosteuden siirtymisen takaisin rakennusperustaan eli sisäänpäin suuntautuvan höyrypaineen. Lämmöneristeellä tulee olla huokoinen ja hengittävä rakenne, jolla mahdollistetaan vesihöyryn nopea siirtyminen eristeen läpi maaperään. Tiiviillä eristeellä on suurempi vesihöyryn läpäisyvastus kuin huokoisella eristeellä.

Kuivatuskapasiteetti ja –tarve korostuu rakennusperustoissa, joissa on voimakas kapillaarisuus eri rakenneosien alla. Tällöin tulee käyttää salaojarakenteen omaavia eristyslevyjä. Tiiviit eristeet vaativat lisäksi erillisen salaojituskerroksen, joka vaikuttaa kokonaiskustannuksia korottavasti. Lämmöneristeen vahvuus mitoitetaan U-arvon, kuivatustarpeen ja halutun sisäilman laadun mukaan. Mainittu rakenteiden kuivuminen on erittäin tärkeä toiminto kosteussuojaustapahtumassa, koska jokaisessa talossa ja taloudessa muodostuu runsaasti kosteutta jokapäiväisten toimintojen ansiosta jo sisältäpäin. Vanhempiin taloihin johtuu kosteutta huomattavia määriä maasta anturoiden ja lattialaattojen kautta. Tämä aiheuttaa usein kosteusvahinkoja lattioille ja seinien alaosille. Johtuvan kosteuden määrä saattaa vaihdella erittäin paljon riippuen rakennuksen alla olevan maaperän kosteudesta ja kapillaarisuudesta. Kun kellariseinien kuivuminen halutaan maksimoida, tulee lämmöneristykseen ulottua aina anturan alareunaan saakka. Mahdolliset tiivistykset kuten pikeus tulee poistaa seinistä ennen eristeen asentamista. Anturan pikisivelyä ei saa suorittaa etenkään, jos anturassa ilmenee kapillaarisen kosteuden nousua altapäin. Kun antura on ulkoneva, suojataan antura siten, että ylhäältä tuleva vesi ei pääse kastelemaan sitä. Uudisrakentamisessa tulee salaojituskerros asentaa myös anturan alle, joka estää tehokkaasti kapillaarisen kosteuden nousun altapäin.

## 5. Yhteenveto

Maanvastaisten rakenteiden kuivumiseen ja kuivana pysymiseen vaikuttaa useiden oikein tehtyjen rakenneratkaisujen yhteisvaikutus. Näitä ovat oikein muotoiltu pintamaa, toimiva salaojajärjestelmä, kapillaarikatkot sekä pysty- että vaakasuunnassa, sekä erittäin tärkeänä osana oikeanlainen, vesihöyryn vapaasti lävitseen päästävä lämmöneristys. Oikealla lämmöneristyksellä saadaan rakenteen ja maa-aineksen lämpötilaerot riittävän suuriksi, jolloin

varmistetaan vesihöyrynpaine-eroilla vesihöyryn oikea kulkusuunta. Lämmöneristeen pitäessä rakenteen lämpimänä, saadaan rakenteessa kulkeva vesihöyry tiivistymään vedeksi rakenteen ja lämmöneristeen ulkopuolella. Tällöin kastepiste ei pääse muodostumaan rakenneseinään, joissa se ajan mittaan aiheuttaisi ongelmia. Vesihöyryn muuttua vedeksi kylmässä suodatinkankaassa, se valuu pois salaojajärjestelmän kautta. Käytettäessä salaojittavia, hengittäviä lämmöneristeitä varmistetaan sekä rakentamisen että asumisen aikaisen kosteuden poistuminen rakenteista. Myös mahdollisen vesivahingon jälkeinen kuivuminen on nopeaa, ja ylipäättään mahdollista, näillä eristeillä.





# Kosteusteknisesti turvallinen kellarinseinän lämmöneristys ja vedenpaine-eristys uudella Finnfoam CW-300 eristeellä

Henri Nieminen  
Finnfoam Oy, Asso Erävuoma Finnfoam Oy

## Tiivistelmä

Finnfoamin hyviä ominaisuuksia hyödyntämällä olemme kehittäneet kellarinseinään uuden kustannustehokkaan rakenneratkaisun CW-300. Finnfoamin (F-300) ominaisuuksia ovat mm. vesihöyrynläpäisevyys alle  $1,3 * 10^{-12}$  [kg/m\*s\*Pa]. Se on täysin vesitiivis materiaali ja sen lyhytaikainen puristuslujuus on 300 kPa, pitkäaikainen 150 kPa. Finnfoam säilyttääkin mm. näiden ominaisuuksien ansiosta eristysominaisuutensa vaativissakin kohteissa vuosikymmenestä toiseen muuttumattomana. Finnfoam CW- 300 kellarinseinäeristeellä saadaan yhdellä asennuksella vedenpaine-eristys ja lämmöneristys. Tällä rakenneratkaisulla saadaan kellarinseinä/sokkeli toimimaan kosteusteknisesti turvallisiksi ja saadaan sokkeli pidettyä mahdollisimman kuivana.

## 1. Johdanto

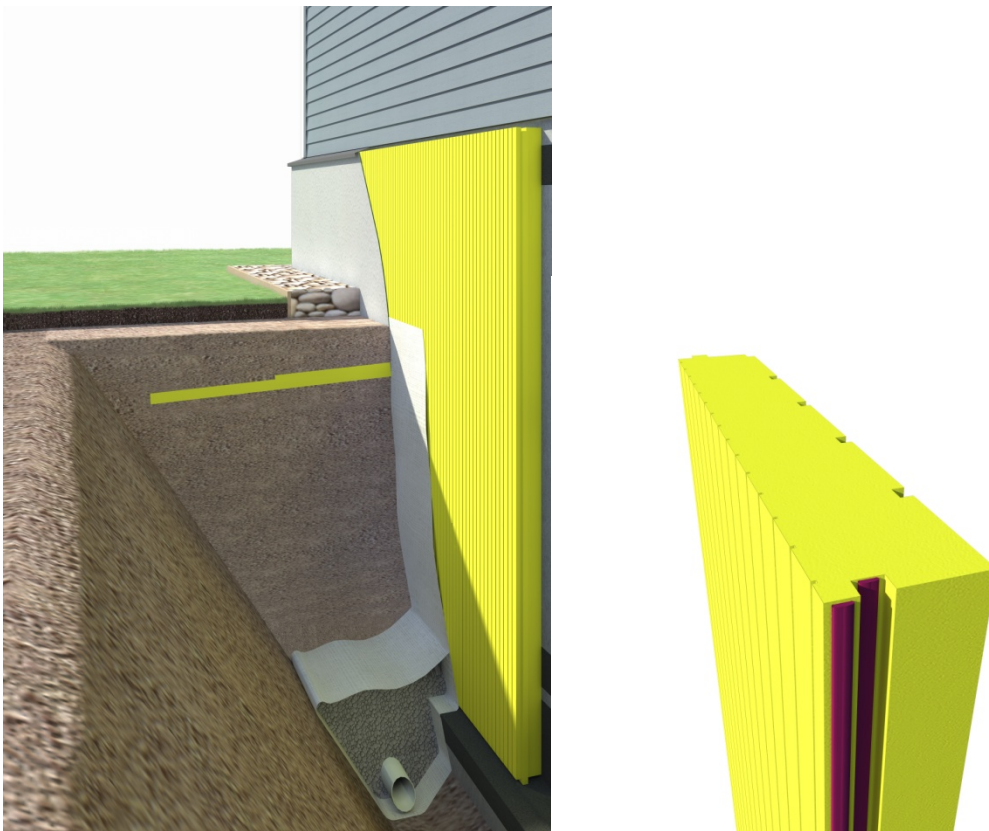
Kellarinseinä on kosteusteknisesti haastava paikka. Se on aina turvallisinta eristää ulkoa päin, jolloin rakenteeseen ei jää riskipaikkoja, mihin voisi muodostua hometta. Finnfoam Oy suosittelee kellarinseinän eristämistä aina ensisijaisesti ulkopuolelta, joko Finnfoamin peruseristelevyillä tai erityisesti kellarinseinään suunnitellulla CW-300-eristelevyillä. Tämä on myös rakennusmääräysten mukainen suositus. Ulkopuolisella eristyksellä saavutetaan tilansäästöä ja massiivinen kantavaseinä saadaan tasaamaan sisäilman lämpötilaa. Finnfoam onkin kehittänyt uuden rakenneratkaisun sokkelin ja kellarinseinän eristämiseen, jolla saadaan aikaiseksi yhdellä asennuksella kellarinseinään lämmöneristys ja vedenpaine-eristys. Rakenne on kosteusteknisesti turvallisista markkinoilla olevista ratkaisuista. Rakenne on VTT:llä sertifioitu (Sertifikaatti Nro VTT-C-4159-09).

## 2. Kustannustehokkuutta ja kosteusteknistä turvallisuutta Finnfoamilla

Finnfoam CW-300 rakenneratkaisulla saavutetaan merkittävää säästöä työkustannuksissa ja parannetaan sokkelin kosteusteknistä toimivuutta. Finnfoam on itsessään täysin vesitiivis solurakenteensa ansiosta. Kun levyjen saumat tiivistetään butyyylimassalla, saadaan koko rakenteesta täysin tiivis niin, että sadevedet valuvat rakenteen ulkopuolella Finnfoamin ulkopinnassa olevia pieniä uria pitkin salaojaan. Sisältäpäin tuleva kosteus pääsee poistumaan Finnfoamissa sokkeliä vasten olevia uria (10x15 mm) pitkin salaojaan. Salaojassahan vesihöyryn osapaine on yleensä alhaisin, koska siellä lämpötila on huomattavasti alhaisempi kuin muualla. Urissa vesihöyryn osapaine seuraa salaojassa vallitsevaa painetta eli vesihöyry virtaa salaojaan päin, jonne se tiivistyy. Tasapainotilanteessa urissa kosteuspitoisuus onkin lämpötilaerosta johtuen yleensä alle 50 prosenttia.

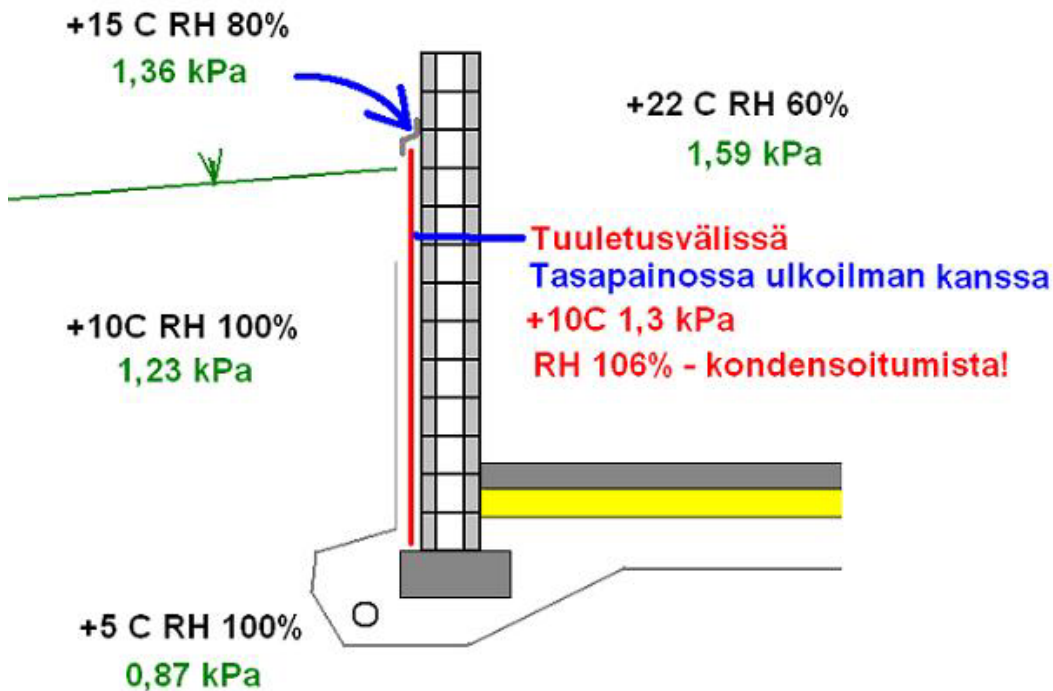
Rakenteessa pystytään optimoimaan sokkelin kosteustekninen toimiminen fysiikan lakien mukaan (VTT). Rakenteeseen ei pääse ulkopuolelta vettä, eikä sen mukana kulkeutuvaa maa-ainesta ja näin tuuletuskanaviston toimintakyky säilyy vuosikymmenet muuttumattomana. Rakenteessa perustusta vasten tulevat tuuletusurat suljetaan ylhäältä ja näin estetään ulkoilman kosteuden pääsy kanaviistoon.

Kellarin seinäeristeessä (CW-300) on myös eristeen ulkopinnassa pienet urat (2x2 mm), joita pitkin vesi pääsee helposti valumaan salaojiin. Finnfoamin ulkopintaan asennetaan suodatinkangas, joka suojaa uria säilyttäen niiden toimintakyvyn vaativissakin olosuhteissa. Finnfoamin ulkopinnassa oleva ”salaojitus”, joka suojataan suodatinkankaalla mahdollistaa ulkopuolisten täyttöjen tekemisen myös perusmaalla (savi, siltti, ym.). Tämä tuo merkittäviä kustannussäästöjä, kun massoja ei tarvitse ajaa edestakaisin. Maan pinnan yläpuolella Finnfoamin pinta voidaan esimerkiksi rapata. Finnfoam CW-300 eristeen ulkopinnassa oleva 2x2mm uritus parantaa rappauksen hyvää tartuntaa Finnfoamiin entisestään.



*Kuva 1. Täyspontatulla CW-300 levyllä rakenteesta saadaan täysin vesitiivis. Butyylimassa voidaan asentaa joko levyn ulkoreunaan tai pontin pohjalle.*

## 2.1 Vesihöyryn käyttäytyminen kellarinseinässä

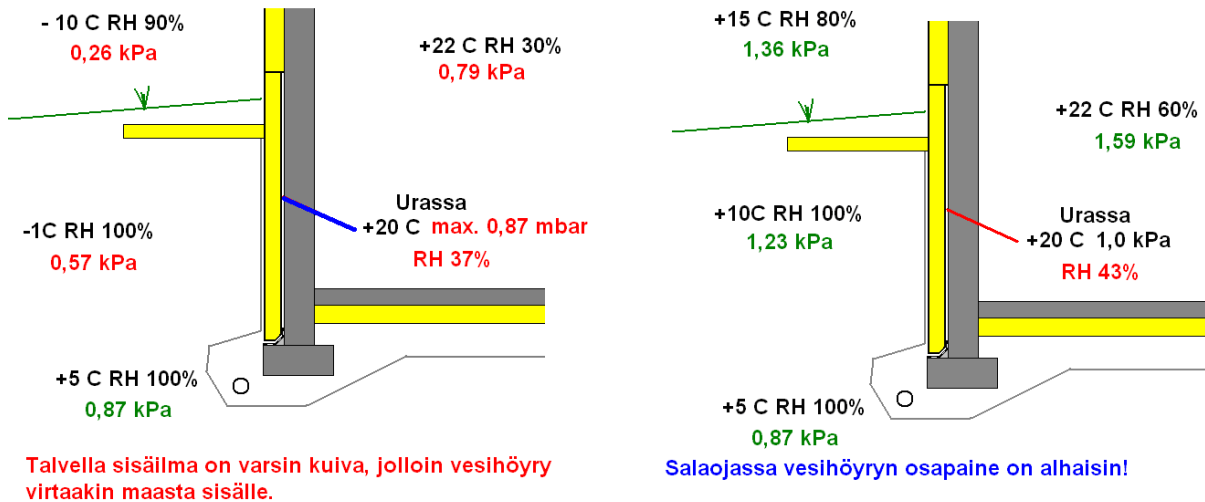


Kuva 2. Kellarinseinä ei tuuletetu ulkoilmaan, kun lämmöneristettä ei ole ulkopuolella.

Kellarinseinä on kosteusteknisesti aika haasteellinen rakenne, johon on aikoinaan tehty aivan päättömiäkin rakenteita. 70-luvulla laitettiin sisäpuolelle puukoolaus ja villaa, ja näin homeelle rakennettiin oikein hyvä pesä. Nykyisin näkee varsin usein rakenteita, johon on tehty ulkopuolelle tuuletettava rakenne – ulkoilmaan ”tuuletettava”. Patolevyllä on ajateltu joskus myös suojattavan lämmöneristeitä, joiden kosteuden kesto ei ole maarakentamiseen soveltuvaa. Tällainen rakenneratkaisu ei ole kosteusteknisesti turvallinen. Kun tuuletustila on uloimpana, on tuuletusvälin lämpötila sama mitä maaperän eli varsin kylmä myös kesällä. Jotta kosteus tuulettuisi patolevyn takaa ulkoilmaan, urissa olevan ilman täytyy olla lämpimämpää kuin ulkoilma. Tämä edellyttää patolevyn lämpöeristämistä ulkopuolelta. (kuva 2.)

Finnfoamin uudessa kellarinseinärakenteessa on kaikki seikat huomioitu.

- 1) Sadevedet eivät pääse lämmöneristeen sisälle, koska Finnfoamin solurakenne on täysin yhtenäinen ja suljettu.
- 2) Finnfoamin täyspontattu sauma tiivistetään butyyylimassalla, jolloin rakenteesta tulee vesitiivis.
- 3) Ulkoilman kosteus ei pääse rakenteisiin, koska tuuletusurat on suljettu ylhäältä. Näin ollen ei myöskään lämpö pääse karkaamaan ulkoilmaan.
- 4) Sisäilmasta tuleva vesihöyry pääsee uria pitkin tuulettumaan salaojiin, jossa vesihöyryn osapaine on alhaisin suurimman osan vuotta.
- 5) Sadevesi pääsee valumaan alas Finnfoamin ulkopinnassa olevia uria pitkin, jotka on suojattu suodatin kankaalla. Näin suurilta massan vaihdoilta säästytään.



Kuva 3. Talvella vesihöyry yleensä virtaa maasta sisälle päin, koska sisäilma on kuivaa. Suurimman osaa vuotta vesihöyryn virtaus suunta on kuitenkin sisäilmasta maahan päin. Finnfoamin CW-300 rakenne toimii hyvin kaikkina vuodenaikoina.

### 3. Yhteenveto

Finnfoam Oy:n pitkällisen kehitystyön tuloksena olemme tuoneet markkinoille kustannustehokkaan tavan eristää kellarinseinät ja sokkelit. Yhdellä asennuksella saadaan aikaiseksi niin vedenpaine-eristys kuin lämmöneristyskin. Tämä helpottaa huomattavasti kellarinseinän eristämistä ja vähentää asennusvirheiden mahdollisuutta. CW-300 on markkinoiden kosteusteknisesti turvallisimman rakennusratkaisu. Rakenne on VTT:llä sertifioitu (Sertifikaatti Nro VTT-C-4159-09). Lujaa Finnfoam toimii maan päällä hyvänä rappausalustana, jossa ulkopinnan uritus varmistaa rappauksen tartunnan. Finnfoamin hyviä ominaisuuksia hyödyntämällä olemme pystyneet kehittämään monia muitakin rakenteita, jotka tuovat rakentamiseen kustannustehokkuutta ja ovat kosteusteknisesti turvallisempia.

### **3. Rakenteiden kosteusvauriot ja korjaaminen**



# Kosteusvaurioiden yleisyys Euroopassa

Ulla Haverinen-Shaughnessy

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Ympäristöterveyden osasto

## Tiivistelmä

Arviot kosteusvaurioiden yleisyydestä eri maissa ovat vaihdelleet 2 - 85%:n välillä [1, 2] riippuen mm. tutkimuksesta, käytetyistä menetelmistä ja kosteusvaurion määritelmästä. On myös todennäköistä, että kosteusvaurioiden yleisyys rakennuskannassa vaihtelee ajallisesti riippuen monista ulkoisista tekijöistä kuten taloustilanteesta ja/tai rakennusten kunnossapitoon käytetyistä resursseista sekä ympäristöolosuhteista ja niiden muutoksista. Tiedon lisääntyminen, kosteusvaurioiden haitallisuuden tunnistaminen, sekä yhteys terveysvaikutuksiin lisäävät ennaltaehkäiseviä ja korjaavia toimenpiteitä kosteusvaurioiden välttämiseksi. Siksi arvioiden kosteusvaurioiden yleisyydestä tulisi perustua suhteellisen uusiin tutkimuksiin, huomioiden käytetyt tutkimusmenetelmät ja määritelmät sekä myös ilmastolliset ja alueelliset tekijät.

## 1. Johdanto

Kosteusvaurioiden yleisyydestä tarvitaan tietoa mm. niiden laajuuden ja vaikutusten arviointiin rakennuskannassa, sekä kansallisesti että esim. EU-tasolla. Arvioiden perusteella voidaan laatia suosituksia tarvittavista toimenpiteistä ja niitä voidaan käyttää päätöksenteon apuvälineenä, mm. määriteltäessä viranomaisohjauksen tarvetta. Tähän mennessä tehdyt tutkimukset kosteusvaurioiden yleisyydestä ovat olleet pääosin yksittäisiä ja alueellisia poikkileikkaustutkimuksia, eikä niiden tuottamia arvioita voida monessakaan suhteessa rinnastaa keskenään. EU-tasolla vertailukelpoisia arvioita on olemassa muutamia.

## 2. Kosteusvaurioiden yleisyys rakennuskannassa

Osana Maailman terveysjärjestölle (WHO) tehtyä tarkastelua tehtiin kirjallisuushaku, jossa hakusanoina käytettiin ”kosteus” (dampness), ”kosteusvaurio” (moisture damage), vesivahinko (water damage), ”home” (mould) tai ”mikrobikasvu” (microbial growth). Haun tuloksista tarkasteluun valittiin suuret satunnaisotokseen perustuvat tutkimukset, jotka oli toteutettu viimeisen 10 vuoden aikana. Lisäksi tarkasteluun otettiin mukaan olemassaolevat tietokannat mukaan lukien Eurostat [3], LARES [4], sekä ECRHS [5, 6]. Kaiken kaikkiaan tarkasteluun sisältyi 15 Euroopassa toteutettua tutkimusta, jotka liittyivät asuinrakennuksiin.

Koulurakennuskantaan liittyviä tutkimuksia on vähän, eikä aikaisemmin ole ollut vertailukelpoista tietoa kosteusvaurioiden esiintymisestä kouluissa. EU-projektin tuloksena on saatu käsitystä kosteusvaurioiden esiintymisestä kouluissa kolmessa maassa [7].

## 2.1 Suuret tietokannat

Suuret tietokannat edustavat monikansallisia selvityksiä, joissa on käytetty samaa kosteusvaurion määritelmää. Tällöin eri maiden välisiä lukuja voidaan paremmin verrata keskenään. Taulukossa 1 on esitetty kosteusvaurioiden yleisyys näiden selvitysten mukaan.

*Taulukko 1. Kosteusvaurioiden yleisyys monikansallisten selvitysten mukaan.*

Viite	Kohdeväestö	Menetelmä	Kosteus-vaurioiden yleisyys
Eurostat 2001 [3]	Väestöpohjainen arvio 13 maasta	Kysely	4.2-35.7%
WHO 2006 [4]	Kahdeksan Eurooppalaista kaupunkia vuosina 2002-2003, n. 400 asuntoa / kaupunki	Tutkijoiden tekemät kotikäynnit, aistinvarainen arvio	25% asunnoista mikrobikasvua vähintään yhdessä huoneessa
Zock ym. 2002 [5]	Väestöpohjainen satunnaisotos, jossa 18873 aikuista (20-45 vuotiaita) 38 tutkimuskeskuksesta 18 maassa	ECRHS-kyselypohjaan perustuva haastattelu	Kyselyä edeltaneen vuoden aikana 12.4% (4-32%) vesivahinko 2.2% (0-16%) vettä kellarin lattialla 22.1% (5-56%) hometta
Gunnbjörnsdottir ym. 2006 [6]	16190 aikuista Islannista, Norjasta, Ruotsista, Tanskasta ja Virossa	ECRHS-kyselypohjaan perustuva haastattelu	18%

Eurostat määrittelee kosteusvaurion termeillä "lahoa, kosteutta tai vuotava katto" ja vuonna 2001 asukkaiden raportoimat havainnot vaihtelivat Suomen 4.2%:sta Portugalin 35.7%:iin. WHO:n LARES tutkimuksessa käytettiin koulutettuja tutkijoita arviomaan asuinrakennusten kosteusvaurioita kahdeksassa eri kaupungissa ympäri Eurooppaa. Tulosten perusteella näkyvää homekasvua esiintyi lähes 25%:ssa asunnoista, mutta maakohtaisia lukuja ei raportoitu alustavassa raportissa. ECRHS ("European Community Respiratory Health Survey") tutkimuksessa selvitettiin kosteusvaurioiden, homeen ja pölypunkkiälytystyksen sekä astman välisiä yhteyksiä 18 maassa, joista 14 sijaitsi Euroopassa; samaa tutkimusprotokollaa sovellettiin myöhemmin lisäksi Islannissa, Norjassa, Ruotsissa, Tanskassa ja Virossa tehdyssä selvityksessä. ECRHS-tutkimuksista saadut tulokset olivat lähellä Eurostat-tuloksia raportoitujen vesivahinkojen suhteen, ja lisäksi ne olivat lähellä LARES-tuloksia homehavaintojen suhteen. Toisaalta raporteista ei täysin selvinnyt, minkä tyyppisistä vaurioista oli kyse.

## 2.2 Maakohtaiset tutkimukset

Loput tarkasteluun sisällytetyistä tutkimuksista rajoittuivat yksittäisiin maihin. Niistä vain yksi, Suomessa tehty tutkimus, perustui tutkijoiden tekemiin havaintoihin [8]. Siinä kosteusvaurioita raportoitiin olevan talotyyppistä riippuen 26-38% asunnoista. Tutkimukseen kerätty aineisto on 1990-luvun alkupuolelta, joten luvut eivät välttämättä kuvaa tämän hetkistä tilannetta.

Kymmenen tarkasteluun sisällytetyistä tutkimuksista perustuivat asukkaiden itsensä raportoimiin havaintoihin [9-18]. Neljä tutkimusta käytti ISAAC-protokollaa ("International Study of Asthma and Allergies in Children"), ja raportoi aikaisemmin ja/tai tutkimushetkellä havaittuja kosteusvaurioita ja/tai hometta 3-36% asunnoista. Näistä korkeimmat prevalenssit tulivat tutkimuksista, joissa tutkittava väestö oli allergisia tai astmaattisia lapsia [9, 10]. Edellä mainitut pois lukien, oli ISAAC-tutkimusten vaihteluväli 3-18%. Loput tutkimukset käyttivät vaihtelevia



määritelmiä, ja niissä raportoitujen kosteusvaurioiden, vesivahinkojen ja kosteuden tiivistymisen osalta vaihteluväli oli 10-18% ja homekasvun osalta 1.5-29%. Pohjois-Euroopassa kosteusvaurioiden esiintyminen vaihteli välillä 5-18% ja näkyvä home 1.5-5% (Taulukko 2). Vertailun vuoksi Venäjällä tehty tutkimus raportoi vesivahinkoja 10%:ssä, ja näkyvää hometta niin ikään 10% asunnoista [19]. Keski- ja Etelä-Euroopan maissa (Englanti, Saksa ja Italia) tehdyissä tutkimuksissa kosteus-/homevaurioita raportoitiin 6-29% asunnoista.

Taulukko 2. Kosteusvaurioiden yleisyys havaintojen tyyppin / ilmaston mukaan.

Määritelmä	Pohjois-Eurooppa; kylmä ilmasto	Keski-/Etelä-Eurooppa; lämmin ilmasto
Kosteusvaurio / vesivahinko	18 % [12] 10 % [13]	-
Havaintoja veden tiivistymisestä kylmiin pintoihin tms.	14% [12] 15% [13]	-
Kosteus	15% [14] 18% [15]	6-10% [17] 19-27% [18]
Home	1.5% [12] 3-5% [13]	21-29% [18]
Mikä tahansa yo. määritelmistä	5 % [16]	5.5-7% [19]

On huomattava, että näihin lukuihin sisältyy suuri joukko sekä tunnettuja että tuntemattomia epävarmuustekijöitä. Niin näiden kuin muidenkin tutkimusten [20] perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että asukkaiden itseraportointiin nojautuvat yleisyysluvut ovat pienempiä verrattuna koulutettujen tutkijoiden tekemiin havaintoihin. Itseraportointi voi myös sisältää raportointiharhaa (esim. oireilevat ihmiset raportoivat vaurioita enemmän oireettomiin verrattuna), mikä tulisi ottaa huomioon tarkasteluissa.

## 2.2 Kosteusvaurioiden yleisyys kouluissa

Parhaillaan käynnissä olevassa EU-hankkeessa kehitettiin Internet-pohjainen kysely, jonka avulla kerättiin tietoja koulurakennuksista, niiden kunnosta ja niissä esiintyvistä kosteusvaurioista Suomessa, Hollannissa ja Espanjassa. Kysely suunnattiin koulujen rehtoreille. Vastauksia saatiin koskien 85 koulurakennusta Espanjassa ja 92 koulurakennusta Hollannissa. Suomessa vastaavia tietoja kerättiin puhelinhaastattelujen avulla, ja lisäksi kerättyjä tietoja täydennettiin aikaisemmin toteutetun valtakunnallisen kyselytutkimuksen tiedoilla, jossa vastausten lukumäärä oli 1152 ja vastausprosentti 42% [21]. Eri tyyppisiä kosteus- ja homevaurioita raportoitiin tutkimushetkellä olevan 24-48% koulurakennuksista. Liialliseen kosteuteen liitetyt ongelmat olivat yleisimpiä Hollannissa (viitaten mahdollisesti riittämättömään ilmanvaihtoon). Kosteusvauriot/vesivahingot puolestaan olivat yleisimpiä Espanjassa, kun taas homeen hajua esiintyi eniten suomalaisissa kouluissa. Maiden välisiä eroja voivat selittää ilmastollisten, alueellisten ja tutkimustapaan (mm. kyselyn kääntäminen eri kielille ja kulttuurilliset erot voivat vaikuttaa internet-vastauksiin) liittyvien erojen ohella mm. havaitut erot rakennusten ominaisuuksissa ja ilmanvaihtotavoissa.

## 3. Yhteenveto

Asukkaiden itsensä havaitsemia kosteusvaurioita on eurooppalaisissa tutkimuksissa raportoitu 1,5-38%:ssa asunnoista, ja kouluissa vaurioita raportoidaan esiintyvän vähintään yhtä yleisesti. Arvioihin kosteusvaurioiden yleisyydestä vaikuttavat paitsi tutkimustapa ja kosteusvauriosta käytetty määritelmä, myös todennäköisesti ilmasto, paikalliset olosuhteet sekä erilaiset rakentamis- ja ilmanvaihtotavat. Suuren vaihtelun vuoksi on raportoiduista kosteusvaurioiden

esiintymislukuista eri puolilla Eurooppaa vaikea vetää selviä johtopäätöksiä; vaikuttaa kuitenkin siltä, että havainnot liiallisesta kosteudesta ja homekasvusta ovat yleisempiä lämpimissä ilmastoissa, kun taas muun tyyppisiä vaurioita ja vesivahinkoja esiintyy suhteellisen yleisesti ilmastosta riippumatta.

## Lähdeluettelo

- [1] Bornehag CG, Blomquist G, Gyntelberg F, et al. Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to "dampness" in buildings and health effects (NORDDAMP). *Indoor Air* 2001;11:72-86.
- [2] Bornehag CG, Sundell J, Bonini S, Custovic A, Malmberg P, Skerfving S, Sigsgaard T, Verhoeff A, EUROEXPO. Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multidisciplinary review of literature (1998-2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects. *Indoor Air* 2004; 14: 243-57.
- [3] Eurostat. Housing problems by socio-economic status. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?\\_pageid=0,1136184,0\\_45572595&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=0,1136184,0_45572595&_dad=portal&_schema=PORTAL), 15.5.2007.
- [4] WHO. Large Analysis and Review of European housing and health Status. Preliminary overview. WHO Regional Office for Europe, European Centre for Environment and Health, Bonn office. June 2006.
- [5] Zock J-P, Jarvis D, Luczynska C, Sunyer J, Burney P. Housing characteristics, reported mold exposure, and asthma in the European Community Respiratory Health Survey, *Journal of Allergy And Clinical Immunology* 2002; 110(2): 285-292.
- [6] Gunnbjörnsdóttir MI, Franklin KA, Norbäck D, Björnsson E, Gislason D, Lindberg E, Svanes C, Omenaas E, Norrman E, Jogi R, Jensen EJ, Dahlman-Höglund A, Janson C. Prevalence and incidence of respiratory symptoms in relation to indoor dampness: the RHINE study. *Thorax*. 2006; 61: 221-225.
- [7] HITEA - Health Effects of Indoor Pollutants: Integrating microbial, toxicological and epidemiological approaches. [www.hitea.eu](http://www.hitea.eu)
- [8] Chehelgo J, Haverinen U, Vahteristo M, Koivisto J, Jääskeläinen E, Husman T, Nevalainen A. Analysis of moisture findings in the interior spaces of Finnish housing stock. *Air Waste Manag Assoc*. 2001; 51: 69-77.
- [9] Tamay Z, Akcay A, Ones U, Guler N, Kilic G, Zencir M. Prevalence and risk factors for allergic rhinitis in primary school children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2007 Mar;71(3):463-71. Epub 2006 Dec 12.
- [10] Bayram I, Güneşer-Kendirli S, Yilmaz M, Altıntaş DU, Alparslan N, Bingöl-Karakoç G. The prevalence of asthma and allergic diseases in children of school age in Adana in southern Turkey. *Turk J Pediatr*. 2004 Jul-Sep;46(3):221-5.
- [11] Bornehag CG, Sundell J, Hagerhed-Engman L, Sigsgaard T, Janson S, Aberg N; DBH Study Group. 'Dampness' at home and its association with airway, nose, and skin symptoms among 10,851 preschool children in Sweden: a cross-sectional study. *Indoor Air*. 2005;15 Suppl 10:48-55.
- [12] Jaakkola MS, Jaakkola JJK. Indoor molds and asthma in adults. *Advances in Applied Microbiology* 2004; 55: 309-38.
- [13] Wickman M, Melén E, Berglind N, Nordvall SL, Almqvist C, Kull I, Svartengren M, Pershagen G. Strategies for preventing wheezing and asthma in small children. *Allergy*. 2003 Aug; 58(8): 742-747.

- [14] Rönmark E, Jönsson E, Platts-Mills T, Lundbäck B. Different pattern of risk factors for atopic and nonatopic asthma among children--report from the Obstructive Lung Disease in Northern Sweden Study. *Allergy*. 1999 Sep;54(9):926-35.
- [15] Turunen M, Paanala A, Niemi M, Villman J, Nevalainen A, Haverinen-Shaughnessy U. Asuin ympäristön laatu, terveys ja turvallisuus - internetpohjainen tiedonkeruu- ja palautejärjestelmä (ALTTI), Kansanterveyslaitoksen julkaisuja B8 (2008).
- [16] du Prel X, Krämer U, Ranft U. Changes in social inequality with respect to health-related living conditions of 6-year-old children in East Germany after re-unification.
- [17] Baker D, Henderson J. Differences between infants and adults in the social aetiology of wheeze. The ALSPAC Study Team. *Avon Longitudinal Study of Pregnancy and Childhood. Journal of Epidemiology and Community Health*. 1999; 53: 636-642.
- [18] Simoni M, Lombardi E, Berti G, Rusconi F, La Grutta S, Piffer S, Petronio MG, Galassi C, Forastiere F, Viegi G; SIDRIA-2 Collaborative Group. Mould/dampness exposure at home is associated with respiratory disorders in Italian children and adolescents: the SIDRIA-2 Study. *Occup Environ Med*. 2005 Sep;62(9):616-22.
- [19] Spengler JD, Jaakkola JJ, Parise H, Katsnelson BA, Privalova LI, Kosheleva AA. Housing characteristics and children's respiratory health in the Russian Federation. *Am J Public Health*. 2004 Apr;94(4):657-62.
- [20] Haverinen-Shaughnessy U, Hyvärinen A, Pekkanen J, Nevalainen A, Husman T, Korppi M, Halla-aho J, Koivisto J, Moschandreas D. Occurrence and Characteristics of Moisture Damage in Residential Buildings as a Function of Occupant and Engineer Observations, *Indoor and Built Environment* 2005; 14: 133 – 140.
- [21] Sisäympäristön laatu ja lasten oppiminen. [www.ktl.fi/koulututkimus](http://www.ktl.fi/koulututkimus)



# Säälle alttiiden puurakenteiden kestoiän mallintaminen

Hannu Viitanen<sup>1</sup>, Tomi Toratti<sup>1</sup>, Ruut Peuhkuri<sup>1,2</sup>, Tuomo Ojanen<sup>1</sup> ja Lasse Makkonen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> VTT

<sup>2</sup> Passivhus.dk

## Tiivistelmä

Säälle alttiina olevien puurakenteiden kestävyys ja kestoikä vaikuttavat monet tekijät samanaikaisesti. Käytännön tarkastelujen mukaan merkittävimmät ovat ympäristöstä ja käytöstä johtuvat kosteuskuormitukset sekä rakenteen soveltuvuus käyttötarkoitukseen. Ennakoituun kestoikäan perustuva kestoikäsuunnittelu perustuu ISO-standardiin 15686, joka määrittelee rakennuksille ja rakennusosille arvioitun kestoiän. Kestoikämalli perustuu vertailuikään sekä siihen vaikuttaviin tekijöihin. Ulkoilmassa säälle alttiit rakenteet on eurooppalaisen standardin EN 335-1 mukaan luokitettu käyttöluokkaan 3: maan pinnan yläpuolella, ei maakosketuksessa olevat rakenteet. Ympäristöstä johtuvat rasitukset kuten ilmasto-olot, ilmansuunta, viistosade ja ympäristön mahdolliset suojaavat tekijät vaikuttavat olennaisesti ulkorakenteiden kestävyys. Rasituksia voidaan arvioida hyödyntämällä lahon aktiivisuutta kuvaavaa lahon kehittymisen mallia sekä yhdistämällä malli kosteusfysiikan ja kestoiän tarkasteluihin. Malli kuvaa lahon kehittymisen kriittisiä tekijöitä: kosteus, lämpötila, vaikutusaika. Lahon kehittyminen pääsee yleensä käyntiin, kun puu on pitkään märkä (puun kosteus yli 25 – 30 %) lämpötilan ollessa samalla sopiva (n. 5 – 40 °C). Lahomallia voidaan käyttää arvioitaessa erilaisten ilmasto-olojen merkitystä rakenteiden kestävyys ja käyttöikä.

## 1. Johdanto

Ulkoilmassa säälle alttiit rakenteet on eurooppalaisen standardin EN 335-1 mukaan luokitettu käyttöluokkaan 3: maan pinnan yläpuolella, ei maakosketuksessa olevat rakenteet [1]. Tämä käyttöluokka on laaja sisältäen mm. julkisivut, aidat, parvekkeet, terassit, sillat, laiturit. On selvää, että kyseiset rakenteet altistuvat hyvin erilaisille ympäristöstä johtuville kuormituksille, jolloin myös niiltä vaaditut kestävyys- ja kestoikäominaisuudet vaihtelevat. WoodWisdom network hankkeessa ”Woodexter” tarkastellaan puisiin ulkorakenteisiin kohdistuvia kosteuskuormia, niistä johtuvia biologisia rasituksia sekä niiden merkitystä rakenteiden kestoikä [2]. Luotettavaan kestoikä tarkasteluun tarvitaan tarkempaa kosteusrasituksen suhteutettua biologisen kuormituksen tarkastelua. Käytännön tarpeita ajatellen ISO 15686 mukainen arviointi antaa peruslähtökohdan kestoikäarviointiin [3]. VTT vastaa yllä mainitussa hankkeessa sää-, kosteus ja biologisen rasituksen mallintamisesta. Tässä esityksessä tarkastellaan lyhyesti kestoikää sekä siihen vaikuttavia tekijöitä ja niiden mallintamista.

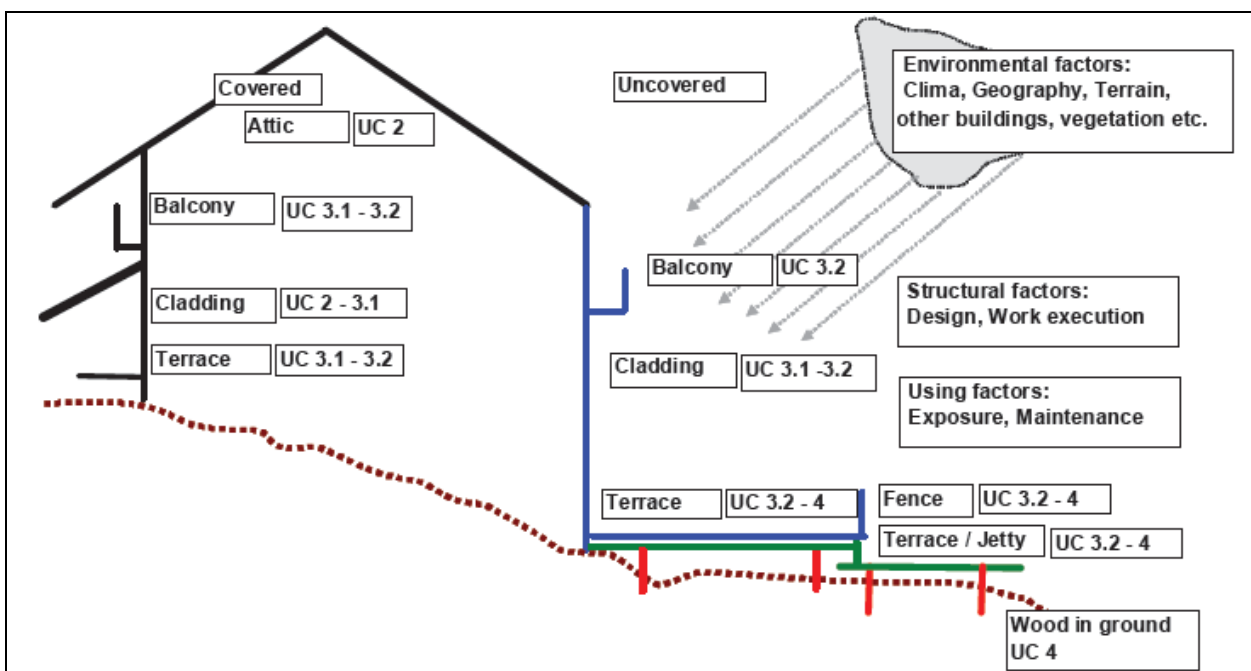
## 2. Kestävyys, käyttöikä, kosteuskuormat ja laho

### 2.1 Kestävyys vaikuttavia tekijöitä on useita ja niiden merkitys vaihtelee

Säälle alttiina olevien puurakenteiden kestävyys ja kestoikä vaikuttavat monet tekijät samanaikaisesti, mutta käytännön tarkastelujen mukaan merkittävimmät ovat ympäristöstä johtuvat kuormitukset sekä rakenteen toimivuus. Kaaviokuvassa 1 on esitetty tiivistetysti

eurooppalaisen standardin EN 335-1 mukaan luokiteltuna käyttöluokkaan 3 sisältyvät rakenteet ja niiden jaottelu.

Ympäristöstä johtuvat rasitukset kuten ilmasto-olot, ilmansuunta, viistosade ja ympäristön mahdolliset suojaavat tekijät vaikuttavat olennaisesti ulkorakenteiden kestävyysasteeseen. Julkisivun osalta eteläseinä on yleensä selvästi rasituksille alttiin, etenkin jos rakennus sijaitsee aukeassa ympäristössä. Ympäristökuormituksen ja rakenteen ohessa puumateriaalilla ja pintakäsittelyllä on suhteellisesti pienempi merkitys, riippuen kuitenkin olennaisesti yllä mainituista tekijöistä. Ankarissa rasitusoloissa puumateriaalin valinta, kyllästys, modifiointi ja sopivat käsittely-yhdistelmät lisäävät puurakenteen kestävyyttä ja kestoikää olennaisesti. Rakenteelliset yksityiskohtat, kuten lautojen jatkokset, saumat ja liitokset sekä kiinnitykset ovat toimivuuden kannalta tärkeimmät tekijät. Toisaalta räystään leveyden, seinän korkeuden, sokkelin korkeuden sekä suojaavien yksityiskohtien merkitystä ei pidä unohtaa: ne lisäävät puurakenteen kestävyyttä usein olennaisesti.



Kuva 1. Standardin EN 335-1 mukainen käyttöikäluokittelu rakennusosittain [2].

Taulukko 1. Puurakennuksen kestoikään vaikuttavia tekijöitä [3; 4].

Tekijät		Vaiheet ja olosuhteet
Rakennuksen ominaisuudet, laatu	Rakennusosan laatu	Valmistus, varastointi, kuljetus
	Suunnittelun laatu	Liitokset, muun rakenteen suojaus
	Työn laatu	Valvonta, ammattitaito, ilmasto-olot työn suorituksen aikana, sääsuojaukset työn aikana
Ympäristöolot	Sisäympäristö	Käyttöolot, sisäympäristön aggressiivisuus, ilmanvaihto
	Ulkoinen ympäristö	Rakennuksen korkeus, sijainti, ilmansuunta, mikroilmasto, saasteet, sääolot
Käyttö	Käyttöolot	Mekaaninen vaikutus, käyttäjäryhmä, kuluminen
	Huollon taso	Huollon laatu ja tiheys

Rakenteen osalta tulee kiinnittää huomiota sekä rakenteisiin että rakenteellisiin yksityiskohtiin (Taulukko 1). Rakennuksen muodon osalta kestävyystarkasteluun liitetään seinän korkeus, räystään leveys ja sokkelin korkeus. Julkisivun rakenteen osalta vastaavasti julkisivun rakenne,

julkisivun toimivuus yleensä, rakennetyyppi, tuulettavuus sekä yksityiskohdat (liitokset, jatkokset, saumat sekä niiden käsittely ja sahaussuunta). Rakennetyyppikohtaiset kuten lautojen jatkokset, saumat ja liittymät ovat tärkeitä rakenteen toimivuuteen ja kuntoon vaikuttavia tekijöitä. Huollon merkitys on myös hyvin tärkeä, kuten mahdollisten vikojen ja korjausmaalaus oikea ja riittävä suoritus.

## 2.2 Käyttöikä tarkastelu

**EU:n rakennustuotedirektiivin [5]** mukaan rakennustuotteiden on täytettävä olennaiset vaatimukset (mekaaninen lujuus ja vakavuus, paloturvallisuus, hygienia, terveys ja ympäristö, käyttöturvallisuus, meluntorjunta sekä energiatalous ja lämmöneristys) **taloudellisesti kohtuullisen käyttöikä ajaksi**. Taloudellisesti kohtuullinen käyttöikä edellyttää, että kaikki tuotteen kustannukset otetaan huomioon: suunnittelu, valmistus, kunnossapito ja huolto sekä käytöstä poistaminen. Lisäksi taloudellisesti kohtuullinen käyttöikä sisältää ympäristönäkökohdat. Tuotteen hyvä säilyvyys ja pitkä käyttöikä parantavat tuotteen kokonaistaloudellisuutta ja ympäristöllistä haitattomuutta, mikä on otettava tuotteiden kehittämisessä ja laadunvalvonnassa huomioon.

Käyttöikä tarkastelun kannalta merkityksellistä on rakenteen tai sen pinnan kunnan vaatimukset ja reunaehdot. Tarkastellaan rakennusosan ulkonäköä tai sen teknistä toimivuutta. Nämä eivät aina osu yhteen, ja joskus rakenteen ulkonäkö voi antaa virheellisen kuvan rakenteen teknisestä kunnosta. Ennakoituun kestoikään perustuva kestoikäsuunnittelu perustuu ISO-standardiin 15686, joka määrittelee rakennuksille ja rakennusosille arvioitun kestoikä. Arvioitu kestoikä perustuu vertailuikään sekä siihen vaikuttaviin tekijöihin A – G (taulukko 2).

Taulukko 2. Puun säänkestävyyteen ja käyttöikään vaikuttavat tekijät [4].

Kerroin	Tekijä	Suunnitteluparametrit
A 1	Puumateriaali	Puumateriaalin sään- ja lahonkestävyys, puulaji, modifiointi, dimensiot
A 2	Pintakäsittely	Pintakäsittelytyyppi ja sen ominaisuudet (kalvon paksuus, peittokyky, pintalämpötila)
B	Suunnittelu, Rakenteet, Yksityiskohdat	Talon rakenne (räystäät yms.), yksityiskohdat, rakennetyyppi (pontti, lomalauta), tuulettavuus, sahaussuunta, jatkokset, varasto, saumojen ja poikkipintojen suojaus, kiinnitys (naulat)
C	Rakentaminen/ toteutus	Yksityiskohtien ja suojauksen toteutus, kiinnityssuunta (pinta/sydän) puun kosteus/ varastointi
D	Rakenteen käyttöolot	Rasitusluokat, ulkoiset rasitukset
E	Säärasitus	Ilman suunta, suojaava ympäristö, ilmasto-olot, viistosade
F	Käyttörasitus/ sisäolot	Rakenteen tai tilan käyttötyyppi (kosteuslähteet, lämmitys)
G	Vikojen korjaus ja huolto	Vikojen huolto, huollettavuus, huoltomaalaus (peittomaalit / kuullotteet) ja sen viivästyminen, uusintamaalaustoimenpiteet

Taulukossa 2 on esitetty standardissa ISO 15686 esitettyyn kestoikä tarkasteluun perustuvan kerroinmenetelmän merkittävimmät tekijät puujulkisivun osalta. Suunnittelijan ja rakentajan tehtävänä on huolehtia, että tuotteen ennakoitu käyttöikä on pitempi kuin rakenteen suunniteltu käyttöikä. Jos tämä ehto ei ole voimassa, suunnitelmaa voidaan muuttaa esimerkiksi valitsemalla toinen pitkäikäisempi tuote, lieventämällä rasituksia (esimerkiksi estämällä kosteuden pääsy rakenteisiin) tai parantamalla rakenteen käytönaikaista huollon tasoa. Yhtenä vaihtoehtona on lyhyempään suunnitteluikään tyytyminen. Jos tämäkään vaihtoehto ei ole mahdollinen, voidaan tuote silti valita, mutta tuotteen lasketut uusimiskerrat on esitettävä kunnossapitosuunnitelmassa.

Ennakoituun käyttöikäen perustuvan käyttöikäsuunnittelun soveltamismahdollisuudet ovat toistaiseksi vähäisiä, koska rakennustuotteista ei ole käytettävissä ennakoituja käyttöikä tietoja.

**Suojausmenettelyn** suunnitteluperiaatteena on varmistaa erilaisin suojaustoimenpitein, että rakenteen materiaaleissa ei tapahdu turmeltumista käytännöllisesti katsoen lainkaan käyttöiän aikana. Suojaus voi perustua ulkoisten olosuhteiden muuttamiseen siten, että rakenteeseen ei kohdistu materiaaleja turmelevia rasituksia tai pinnoitteiden käyttöön, jotka eristävät rakenteen mm. kosteusrasituksilta. Pintakäsittely tulisi toimia niin, että itse suojattavaan materiaaliin ei kohdistu materiaalille kriittistä kosteusrasitusta. Puun suojaus tai puun modifiointi on suojausta, jolla itse materiaalin kestävyysominaisuuksia parannetaan. Puun kemiallinen suojaus tarkoittaa puun käsittelyä kemikaaleilla, jotka estävät vaurioita aiheuttavien organismien kasvun tai ovat niille myrkyllisiä. Kemiallinen suojaus voidaan tehdä eri tavoin: materiaalit käsitellään **kosteuden imeytymistä estävillä** tai vähentävillä aineilla sekä **vaurio-organismien kasvua tai niiden vaikutusta estävillä kemikaaleilla** [6].

Suojausmenettelyn soveltaminen muistuttaa eniten perinteistä rakenteiden kestävyysuunnittelua. Puurakentamisessa käytetään termiä "rakenteellinen puunsuojaus", joka itse asiassa pitää sisällään rakenteiden kosteusteknisen suunnittelun periaatteet. Rakenteen suunniteltu käyttöikä otetaan kuitenkin tässäkin menettelyssä entistä selkeämmin huomioon. Suojausmenettelyssä keskitytään koko rakenteen kestoajan sijasta eri pinnoitteiden ja suojausjärjestelmien kestoikäen, mikä antaa perustan kunnossapitajaksojen arvioimiselle.

**Puutuotteen kestävyys arvioinnissa** pitää ottaa huomioon aiotut käyttöolosuhteet ja huolto. Kestävyys on toimivuusominaisuus ja kestävyyttä voidaan tarkastella koko tuotteen kannalta tai yksittäisten toiminnallisten ominaisuuksien kannalta. Oletuksena on, että tuotteen ominaisuudet pysyvät hyväksyttävällä tasolla koko sen toiminnallisen käyttöiän ajan. Arvioinnissa otetaan huomioon tavanomaisesti esiintyvät rasitukset. Käyttökohteessa kestävyteen vaikuttavat ennen kaikkea ilmastolliset tekijät ja puutuotteen luontaiset ominaisuudet sekä pintakäsittely-yhdistelmä ja huolto.

### 2.3 Kosteuskuormat ja puun lahonkestävyys

Puun osalta on otettava huomioon, että puu saa ja sen tulisi hajota biologisesti tai polttamalla käytön jälkeen esim. jätteiden hävittämisen yhteydessä. Tässä suhteessa puun hyviä kierrätettävyyden ominaisuuksia ei tule tarpeettomasti muuttaa. Luonnollisesti käyttöikäsuunnittelu on tärkeintä rakenteilla, jotka joutuvat alttiiksi säälle tai muuten sellaisiin rasituksiin, joissa materiaalien nopea turmeltuminen on mahdollista. Materiaalien homehtuminen ja vanheneminen on osaltaan käyttöikäen vaikuttava tekijä, vaikka vaurioiden ja vikojen määrittely voi olla käytännössä liukuvaa. Jos rakenne tai materiaali ei täytä olennaisia käyttäjien vaatimuksia esim. ulkonäön tai terveyden tai viihtyvyyden osalta, voi kestoikä materiaalin tai rakennusosan osalta olla loppu. Pintakäsittely on osa suojaavaa rakennekerrosta, jolloin sen kesto- ja käyttöikä on eri kuin suojattavan alustarakenteen kestoikä.

Sadeveden, valuma- tai pintavesien sekä maakosteuden pääsy rakenteisiin on tavallisin syy rakenteiden kosteusongelmiin [7]. Syynä näihin perustuvanlaatuisiin ongelmiin ovat mm. huono toteutuksen ja suunnittelun laatu, puutteellinen rakennusaikainen kosteudensuojaus tai ajattelemattomuus ja huolimaton toteutus. Ankariin rasitusoloihin tarkoitetun puutuotteen lahonkestävyys on varmistettu kyllästäväällä tai puun modifiointimenetelmillä. Vaatimusten mukaan kyllästetyn männyn pintapuun kestävyys on hyvä, joskin siinäkin voidaan havaita jonkin verran vaihtelua kyllästeestä ja ilmeisesti myös puun laadusta riippuen.

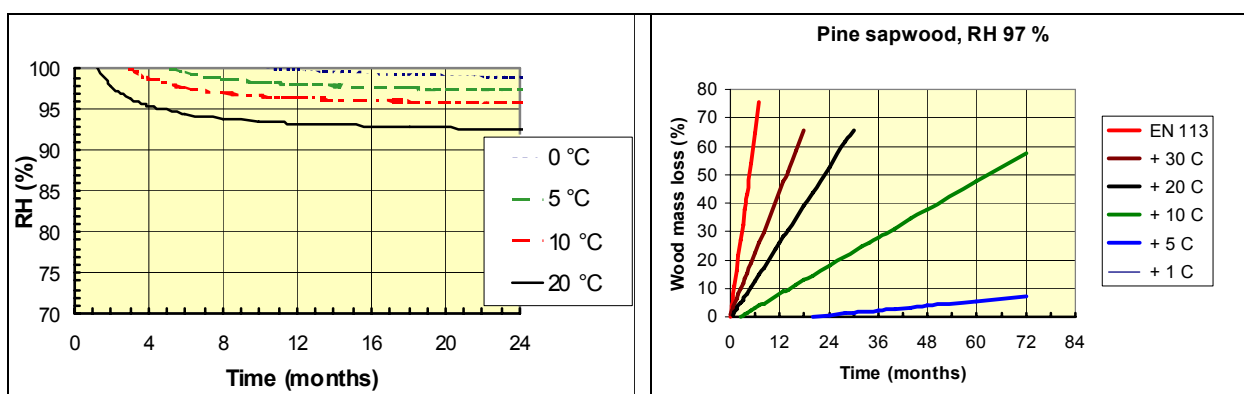


Puun kestävyys vaikuttaa myös puulaji (Taulukko 3). Esim. lehtikuusen sydänpuun lahonkestävyys vaihtelee eri lehtikuusityyppien välillä vastaten suurin piirtein männyn sydänpuun lahonkestävyyttä. Sellaisenaan lehtikuusen sydänpuun kestävyys ei vastaa standardien mukaan kyllästetyn männyn pintapuun lahonkestävyyttä. Lämpökäsitellyn Thermowood s puun kestävyys ei pintapuun osalta vastaa kyllästettyä puuta, mutta sydänpuun osalta kestävyys on vähintään samaa luokkaa. Puutuotteiden kestävyttä ei kuitenkaan voida arvioida pelkästään puun luontaisen kestävyuden mukaan. Esim. fenolifilmillä tai maalauskalvolla pinnoitettu koivuvaneri saattaa kestää ulko-oloissa paremmin kuin vastaava kuusivaneri, vaikka koivun kestävyys on yleensä heikompi kuin kuusen [8].

Taulukko 3. Eräiden puulajien sydänpuun lahonkestävyys standardin EN 350-2 mukaan [9].

Luokka	Kestävyys	Esimerkilajeja
1	hyvin kestävä	tiikki, iroko, afzelia, bilinga
2	kestävä	jättituija, amerikanmahonki, tammi
3	kohtalaisesti kestävä	mänty, lehtikuusi, douglaskuusi, hikkori, afrikanmahonki
4	jonkin verran kestävä	mänty, kuusi, hemlok, kuusi
5	ei kestävä	koivu, leppä, haapa, pyökki, vaahtera

Lahon kehittymisen keskeiset tekijät ovat vesi (kosteus), lämpötila, vaikutusaika ja materiaali. VTT:ssä on lahon kehittymisen keskeiset tekijät mallinnettu [10]. Lahon kehittymisen alkamiseen tarvittavat kriittiset olot ja niiden vaikutusaika on esitetty kaaviossa 2. Lahon kehittyminen pääsee yleensä käyntiin, kun puu on pitkään märkä (puun kosteus yli 25 – 30 %). Lahon kehittyminen on yleisintä puussa, jonka kosteus on yli 40 – 60 % puun kuivapainosta, lämpötilan ollessa samalla riittävä (n. 5 – 40 °C).

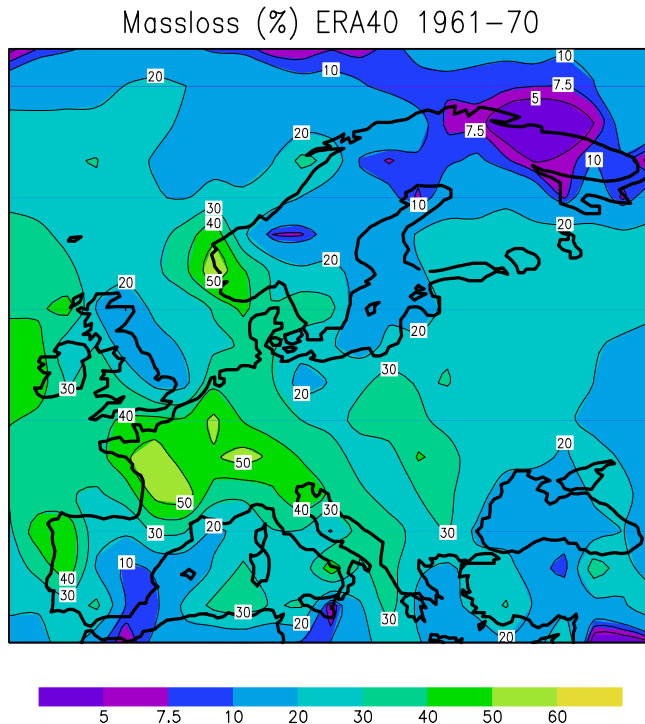


Kuva 2. Ruskolahon alkamiseen tarvittavat kriittiset olot männyn pintapuussa (vasemmalla) sekä lämpötilan merkitys lahon kehittymiseen yli RH 97 %:n kosteudessa (oikealla). Ruskolaho on hankalin rakenteiden toimivuutta haittaava lahotyyppi.

Puun tai lahoa vastaan suojatun puun kestävyys mitataan lahon kannalta optimaalisissa oloissa, (ns. worst case scenario). Tällöin ei mitata puutuotteiden kestävyttä todellisissa käyttöoloissa, mikä vaikeuttaa tulosten tarkastelua käyttöiän ja kestoian kannalta. Kuvassa 2 on verrattu standardin EN 113 [11] mukaisessa kokeessa saatua lahon kehittymistä todellisia oloja paremmin kuvaavassa kosteuskuormituksessa. Tällöinkin kuormitus on koko ajan normaalin käyttöoloa suurempi. Laho ei käytännössä kehity alle RH 95 % ilman suhteellista kosteutta vastaavissa oloissa.

### 3. Kestoiän mallintaminen

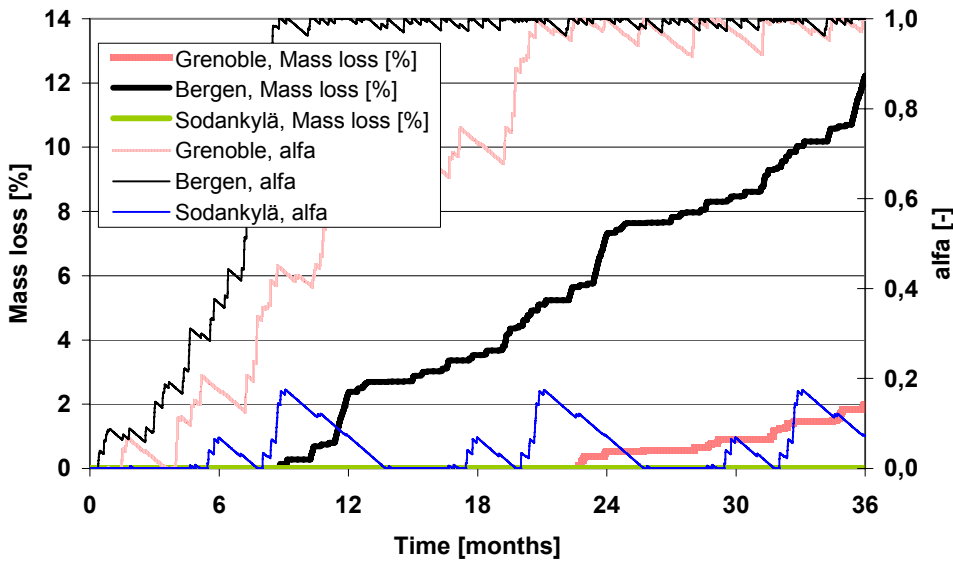
Laho on ankarin puuta rasittava biologinen tekijä ja sen kehittymistä on VTT:llä mallinnettu perustuen lähteen [10] kokeisiin vakio-olosuhteissa. Malli on aika-askeleittain tapahtuva prosessi, jolloin sillä voidaan simuloida vaihtuvia kosteus- ja lämpötila olosuhteita. Tämä luo mahdollisuuden soveltaa kokeista saatua tietoa luonnon olosuhteisiin. Malli on täydellisemmin kuvattu lähteessä [2]. Lahon syntyminen ja kehittyminen riippuu olennaisesti kosteudesta, lämpötilasta ja vaikutusajasta (kuva 2). Kehitettyä mallia on sitten käytetty Euroopan sääolojen simulointiin niin, että Euroopan sääoloja voidaan kuvata lahon kehittymisen kannalta (kuva 3). Vastaavia tuloksia on saatavissa myös eri ilmansuuntiin kääntyville julkisivuille.



Kuva 3. Ilmaston kuormituksen aiheuttama lahoriski. Kuormitus on esitetty teoreettisten painohäviöarvojen (%) jakaumana Euroopassa. Arvot kuvaavat hyvin pienten ja ohuiden männyn pintapuukappaleiden lahoa suorassa sääaltistuksessa, sateelle alttiina, 10 vuoden altistumisaikana aikavälillä 1961-1970 [2].

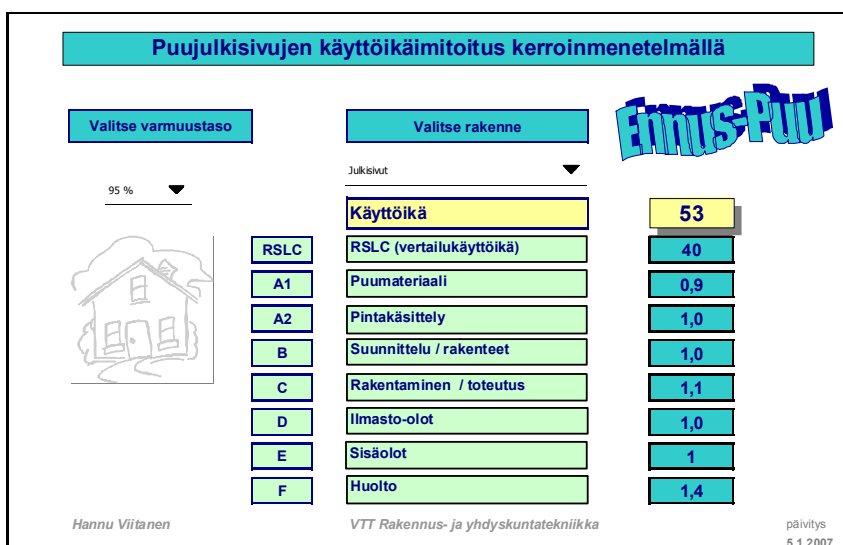
Samaa lahomallia on myös yhdistetty suoraan rakennusfysikaalisten simulointitulosten tarkasteluun, jossa kohteena on esimerkiksi käytetty viistosateelle altista puujulkisivurakennetta eri puolilla Eurooppaa [2]. Tarkastelu antaa teoreettisen pohjan sääolojen merkityksestä ulkona olevan suojaamattoman julkisivurakenteen kestävyydelle lahoa vastaan. Kuva 4:ssä esitetyn tarkastelun mukaan Pohjois-Suomessa lahoriski on olematon, mutta suurin se on Norjassa, Bergenissä. Grenoblessa Ranskan Alpeilla lahoriski on pienempi kuin Bergenissä mutta suurempi kuin Sodankylässä. Nämä tulokset ovat yhteneviä Kuva 3:n sääaltistuskartan kanssa.

Siinä missä Kuva 3:n kaltainen Euroopan tai muun alueen sääaltistuskartta antaa vallitseviin pitkän ajan ilmasto-oloihin perustuvan karkean arvion lahoamisriskin suuruudesta rakennuksen sijainnin perusteella, antaa rakennusfysikaalisen simulointimallin ja lahon kehitysmallin yhdistäminen yksityiskohtaisempaa tietoa rakenteen toimivuudesta. Tähän toimivuuteen kuuluu tekijöinä myös mm. julkisivun tuulettuvuus, säteilyolosuhteet ja muut rakenneyksityiskohdat, joiden rakennusfysikaalinen toimivuus arvioidaan parhaiten dynaamisin simuloinnein.



Kuva 4. Teoreettinen tarkastelu mahdollisen lahon kehittymisestä eri puolilla Eurooppaa. Tarkastelun kohteena on viistosateelle altis, käsittelemätön eteläjulkisivurakenne. Tarkastelu perustuu kosteusfysiikan laskentaohjelmalla (Wufi) tehtyyn laskentaan ja se kuvaa männyn pintapuun uloimman ohuen pintakerroksen alttiutta lahon alkamiselle (alfa-faktori) ja lahon kehittymiselle (mass loss). Bergen on lahon kannalta tarkasteltuna rasittavin alue [2].

Kestoiän mallintamisessa sääaltistuskarttoja voidaan siksi hyvin hyödyntää tarkastelemalla rakennuksen sijaintia kartalla. Tämän lisäksi tarvitaan tarkemmat tiedot rakennuksen lähiympäristöstä, rakenteista, materiaalista, pintakäsittelyistä, rakennuksen käyttöoloista ja huoltotoimista. Hyödyntämällä kappaleessa 2 mainittua kestoikä tarkastelua, voidaan kestoikää ja siihen vaikuttavia tekijöitä arvioida ISO 15686 standardissa esitetyn faktorianalyysin mukaan. Analyysissä jokaiselle tekijälle annetaan teoreettinen painoarvokerroin, jolloin tulo kertoo eri tekijöiden merkityksen arvioituun kestoikään. Arviointimenettely on vain suuntaa-antava, ja se ei anna absoluuttista kestoikäarvoa. Kuvassa 5 on esitetty osa VTT:n EnnusPuu -ohjelmasta, jota hankkeessa kehitetään edelleen.



Kuva 5. Esimerkki VTT:lla kehitetystä kerroinmenettelyn kestoikä laskelmasta, puinen julkisivu.

Australiassa on puurakenteiden kestoikäarvioinnissa edistytty [12]. Tarkoitus on, että myös Euroopassa voidaan puurakenteiden kestävyyttä ja kestoikää suunnitella ja arvioida mahdollisimman luotettavilla työkaluilla. Nyt kehitetty rasi-tusta kuvaava tarkastelumalli antaa siihen hyvät lähtökohdat.

#### 4. Yhteenveto

Kestoikäsuunnittelu on keskeinen rakenteiden käytettävyyden ja toimivuuden arviointimenettely. Suunnitteluun sisältyy rasi-tusten, kuten kosteuskuorman sekä eri tekijöiden merkityksen arviointi. Arvioinnissa voidaan käyttää apuna kosteuskuormituksen vakavuutta kuvaavaa lahon kehittymisen mallia. Mallilla voidaan arvioida mm. kosteusrasituksen vaikutusta puurakenteiden kestävyyyteen eri ilmasto-oloissa.

#### Lähdeluettelo

- [1] EN 335-1 (2006) Durability of wood and wood based products – Definition of use classes – Part 1: General. CEN. European committee for standardization.
- [2] Viitanen H., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Toratti, T. and Makkonen, L. (2008). Service life of wooden materials – Mathematical modelling as a tool for evaluating the development of mould and decay. Final conference proceedings. Bordeaux – France 29-30 September 2008. Sustainability through new technologies for enhanced wood durability. “Socio-economic perspectives of treated wood for the common European market”, p. 85 – 96.
- [3] ISO 15686-1 (2006). Building and construction assets – Service life planning – Part 1: General principles.
- [4] Vesikari, E., Rautiainen, L., Häkkä-Rönholm, E., Silvennoinen, K., Salonvaara, M. and Viitanen, H. 2001. Julkisivujen ja katteiden käyttöiän ennakointi. Espoo, VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, VTT Julkaisuja; 850, 158 s
- [5] EU:n rakennustuotedirektiivi
- [6] Puun suojaus, käsikirja. RIL, LTY.
- [7] Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A ja Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toimivuus. VTT Tiedotteita 1991. 160 s.
- [8] Viitanen, H. , Nurmi, A., Metsä-Kortelainen S., Jämsä, S. and Paajanen L. 2008. Effect of coatings on the performance and durability of Birch plywood – Results after outdoor weathering and accelerated decay resistance assessments. Proceedings of the International panel Products Symposium. 24<sup>th</sup>-26<sup>th</sup> September. Espoo Finland.
- [9] EN 350-2 (1994) Durability of wood and wood based products. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance of Europe. CEN. European committee for standardization.
- [10] Viitanen (1997) Modelling the time factor in the development of brown rot decay in Pine and Spruce sapwood- The effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung* 51 (1997) 99-106.
- [11] EN 113 (1997) Wood preservatives – The method for determining the protective effectiveness against wood destroying Basidiomycetes. Determination of toxic values. CEN. European committee for standardization
- [12] Wang, C.H., Leicester, R.H. and Ngyen, M.N. (2008) Timber Service life design. Manual No 4. Decay above ground. CSIRO. 109 p.

# Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen

Susanna Peltola<sup>1</sup> ja Vesa Asikainen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Teknillinen korkeakoulu, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos

<sup>2</sup> Kuopion yliopisto, ympäristötieteen laitos

## Tiivistelmä

Vuodenvaihteessa julkaistiin korjausopas *Sisäilmaongelmaisten koulujen korjaaminen, Osa 1: Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnan tutkimiseen ja korjaushankkeisiin, Osa 2: Suunnittelijan opas koulurakennusten sisäilmasto-ongelmien ja kosteusvaurioiden korjaamiseen* [1].

Osa 1, Kiinteistön omistajan opas ohjeistaa miten toimia epäiltäessä sisäilmaongelmaa. Oppaassa korjausprosessi käsitellään kattavasti lähtötilanneselvityksen tekemisestä ja jatkotutkimusten tilaamisesta, kuntotutkimusten kautta korjauksen toteutukseen ja valvontaan sekä jälkiseurantaan.

Suunnittelijan opas, Osa 2, pyrkii huomioimaan rakennuksen LVI-tekniikan ja rakenteellisen toiminnan kokonaisuutena. Se esittelee korjausratkaisumalleja 1950-luvulla ja myöhemmin rakennettujen koulurakennusten tyypillisiin riskirakenteisiin ja ongelmiin korjaussuunnittelijan työn tueksi.

## 1. Johdanto

Koulurakennusten sisäilmasto on usein huono [2] ja rakennuksissa esiintyy myös usein terveydelle haitallisia homevaurioita. Monet koulujen korjaukset ovat olleet joko yli- tai alimitoitettuja, usein alimitoitettuja, jolloin yksi korjauskerta ei ole riittänyt. Jopa melko hyväkuntoisia koulurakennuksia on jouduttu purkamaan, kun toimivia korjausratkaisuja ei ole ollut saatavilla.

Sisäilman laadun ja ongelmien havainnoiminen mittauksin on vaikeaa, sillä sisäilmaongelmat voivat olla erittäin monimuotoisia, eikä niistä vielä tiedetä riittävästi. Usein unohdetaan tarkastella rakennusta rakenteiden ja ilmanvaihdon kokonaisuutena. Suunnittelijoiden käyttöön tarkoitetuille, yleisesti hyväksytyille toimiville korjausratkaisuille on suuri tarve. Näiden puutteiden korjaamiseksi käynnistettiin projekti *Vaativien sisäilmaongelmakorjausten diagnostiikka, ratkaisut ja prosessi*.

Projektin myötä havaittiin, että erityisesti pienemmissä kunnissa on puutteellista tietoa korjausprosessin läpiviennistä. Koulukiinteistöjen omistajat puolestaan kaipasivat eri tasoisia korjausvaihtoehtoja – lyhytaikaisia ratkaisuja, joilla selvitetään lähestyvään peruskorjaukseen asti ja toisaalta uutta vastaavia ratkaisuja. Projektin tuloksena syntyi opas *Sisäilmaongelmaisten koulujen korjaaminen, Osa 1: Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnan tutkimiseen ja korjaushankkeisiin, Osa 2: Suunnittelijan opas koulurakennusten sisäilmasto-ongelmien ja kosteusvaurioiden korjaamiseen* [1].

## 2. Oppaan tavoitteet, tausta ja periaatteet

### 2.1 Oppaan tavoitteet

*Sisäilmaongelmaisten koulujen korjaaminen* -oppaan tavoitteena oli parantaa koulujen korjausten onnistumisia ja niiden tarkoituksenmukaisuutta. Toisin sanoen haluttiin luoda ohjeistus koulurakennuksen kunnon tutkimiseen ja korjaushankkeiden läpivientiin sekä luoda yleisesti hyväksytyt rakenteiden ja ilmanvaihtojärjestelmien korjausratkaisut suunnittelijoiden käyttöön. Opas rajattiin koskemaan 1950-luvulla ja sitä myöhemmin rakennettuja kouluja.

### 2.2 Oppaan tausta

Oppaan teossa, erityisesti laadittaessa korjausratkaisuja, joista on vielä hyvin vähän tutkittua tietoa ja ongelmat ovat erittäin monimuotoisia, yhdistettiin projekti- ja kirjoitusryhmän laaja asiantuntemus. Ryhmässä oli edustajia niin valtion hallinnosta (Opetushallitus, Tekes, Ympäristöministeriö) koulukiinteistöjen omistajatahoilta (HKR-Rakennuttaja, Espoo, Jyväskylän maalaiskunta, Jyväskylä, Kotka, Vihti, Korpilahti), konsulttitoimistoista (Hengitysliitto Heli ry, Ins.tsto Mikko Vahanen Oy, Ins.tsto Mittatyö Jukka Holopainen Oy, Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelu Oy, Pöyry CM Oy, Mikrosem Oy, Finnmap Consulting Oy, PÖYRY building service Oy, Optiplan Oy, Raksystems Oy, ClimaConsult Finland Oy) kuin tutkimuslaitoksista (KY:n ympäristötieteen laitos, TKK:n LVI- ja talonrakennustekniikat).

Projektiosapuolten kokemuksia ongelma-alueista kartoitettiin aluksi haastatteluilla. Näiden haastattelujen ja projektissa mukana olleiden kuntien ongelmakouluissa tehtyjen tutkimusten perusteella päädyttiin koulurakennusten tyypillisimpiin ongelma-alueisiin, joista keskusteltiin workshoppeissa. Keskustelujen perusteella tutkijat kehittivät erilaisia ja -tasoisia korjausratkaisuja ja prosessin ohjausperiaatteita. Näitä ehdotuksia kommentoitiin ja työstettiin taas useaan otteeseen workshoppeissa. Näin päästiin yhteisymmärrykseen toimivista menettelytavoista ja korjaamisen periaatteista.

### 2.3 Korjaamisen periaatteet

Toisin kuin useissa epäonnistuneissa korjauksissa, oppaassa pyritään arvioimaan rakennusta kokonaisuutena, ilmanvaihdon ja rakenteiden yhteistoimintana. Ongelmana on, ettei sisäilman laatua pystytä kaikilta osin mittaamaan. Oppaassa korostetaan syy-seuraussuhteen osoittamista, mihin pelkkä materiaalinäytteen mittaustulos ei riitä.

Koska rakennus on aina yksilöllinen, selkeätkään riskirakenteet eivät kaikissa rakennuksissa ole laenneet. Ratkaisevia syitä tähän voivat olla erot mm. ympäröivissä olosuhteissa, rakenneyksityiskohdissa ja käytössä. Siksi esitetyt korjausratkaisut on tarkoitettu suunnittelutyön pohjaksi, sovellettaviksi kuhunkin kohteeseen, ei käytettäväksi sellaisenaan.

## 3. Oppaan rakenne

*Sisäilmaongelmaisten koulujen korjaaminen* -opas muodostuu kahdesta erillisestä osasta:

- Osa 1: Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnon tutkimiseen ja korjaushankkeisiin,
- Osa 2: Suunnittelijan opas koulurakennusten sisäilmasto-ongelmien ja kosteusvaurioiden korjaamiseen

Osa 1 neuvoo miten kiinteistön omistajan tulee toimia käyttäjien oireillessa tai havaittuaan vaurioita tai sisäilmaongelmia. Oppaassa ohjeistetaan lähtötilanneselvityksen tekeminen ja jatkotutkimuksen tilaaminen, varsinaiset tutkimukset sekä korjausprojektin toteutus, valvonta ja jälkiseuranta.

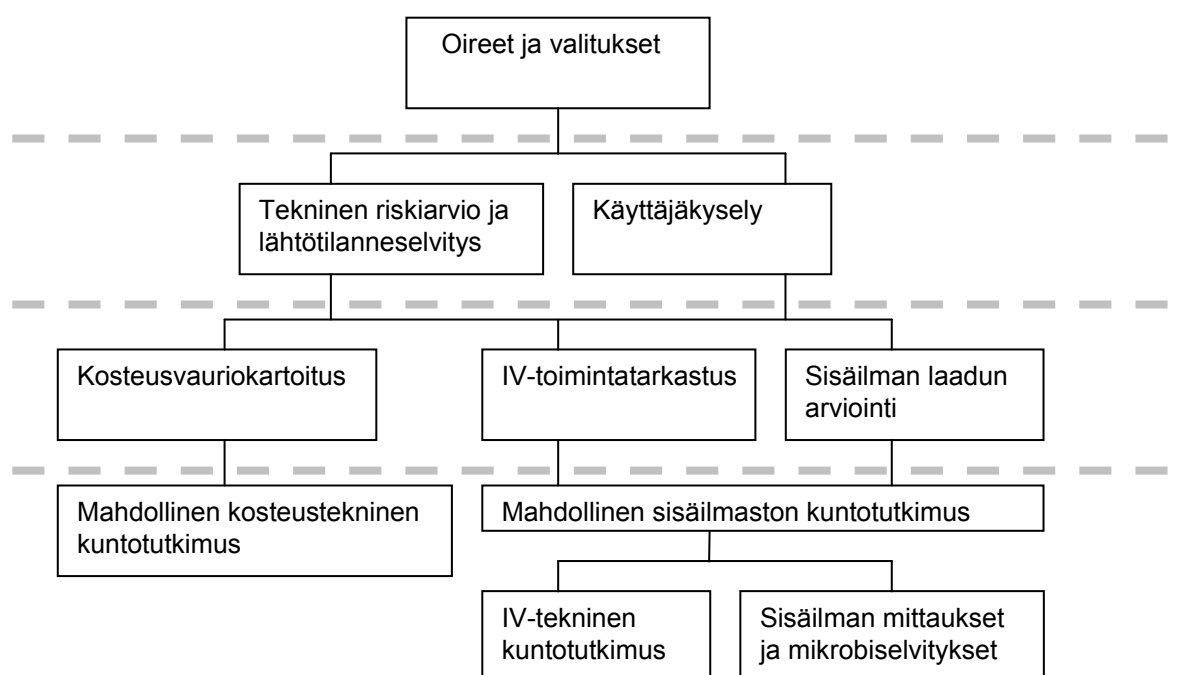
Osa 2 sisältää korjausohjeita suunnittelijoiden käyttöön. Osa on käytännön syistä jaettu kolmeen toistensa rinnalla toimivaan osaan:

- Ilmanvaihdon korjausratkaisut, jotka on jaettu kokonaan korjattaviin ja osittain säilytettäviin ratkaisuihin
- Eri rakenneosien korjausratkaisut
- Erityistoimenpiteet, joita käytetään muiden korjausratkaisujen osana.

### 3.1 Osa 1: Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnan tutkimiseen ja korjaushankkeisiin

#### 3.1.1 Kuntoarviot ja -tutkimukset sekä raportointi

Kun sisäilmaongelmat on havaittu, ei tarvittavien tutkimusten laajuutta vielä yleensä tiedetä. Ja on edettävä askel kerrallaan, tutkimuksia syventäen. Rakennuksen kunnan selvittäminen aloitetaan ammattitaitoisen ja kokeneen kuntotutkijan tekemällä lähtötilanteen selvittämisellä, joka sisältää teknisen riskiarvioinnin ja rakennuksen käyttäjien oirekyselyn. Näiden perusteella kuntotutkija laatii raportin, josta selviää jatkotutkimustarve, sekä mahdollisesti tarvittavien tutkimusten laajuus ja kustannukset. Raportissa esitetään lisäksi käytetyt menetelmät ja saadut tulokset.



Kuva 1. Kaavio rakennuksen kunnan arvioinnin ja tutkimuksen etenemisestä.

Lähtötilanneselvityksen ja käyttäjäkyselyn perusteella tehdään kuvan 1 mukaisesti kosteusvaurio- ja IV-toimintakartoitukset sekä sisäilmaston laadun arviointi. Kosteusvauriokartoitus sisältää kaikkien tilojen ja rakenteiden katselmuksen, pintakosteuskartoitukset riskirakenteista sekä kosteuden mittaamisen rakenteita avaamatta.

Ilmanvaihdon toimintatarkastus sisältää ilmanvaihtojärjestelmän ja muun talotekniikan toimintatarkastuksen sekä lämpötilapoikkeamien, vedon ja paine-erojen mittaamisen. Tarvittaessa mitataan myös hiilidioksidipitoisuudet. Sisäilman laadun arviointi tapahtuu aistinvaraisesti.

Seuraavalla tasolla tehdään rajatuille alueille tarvittaessa varsinaiset kosteus- ja LVI-tekniset kuntotutkimukset sekä sisäilman mittaukset ja mikrobiselvitykset. Tutkimukset voivat sisältää rakenteiden avauksia näytteiden ottamista ja kosteus- ja lämpötilamittauksia varten, ilmavirtojen mittauksia ja kanavistojen puhtauden tarkistamisen, sekä erilaisia sisäilman mittauksia ja selvityksiä, kuten VOC-mittauksia.

Tulosten perusteella pyritään määrittämään vaurioitumismekanismit sekä löytämään piilovauriot. Tuloksista kirjoitetaan tutkimustulosraportti, joka sisältää tutkimuksen perustiedot, kohteen tiedot, kaikki tutkimukset - rakenne, LVI ja sisäilma – yhdistettyine tuloksineen, vaurioiden sijainnin ja laajuuden sekä syyt ja vaurioitumismekanismit. On erittäin tärkeää, että eri tutkimustuloksia analysoidaan kokonaisuutena. Lisäksi raportista tulee ilmetä sopivat korjaustavat ja -materiaalit.

### 3.1.2 Korjauksen toteutus ja valvonta

Jotta korjaus voisi onnistua, on tiedonhallintaan kiinnitettävä erityistä huomiota. Oleellisen tiedon on kuljettava oikea-aikaisesti kuntotutkijan, korjaussuunnittelijan, korjauksen toteuttajan, projektin valvojan ja projektinjohtajan välillä. Jälkiseurannan takia ovat myös kiinteistön käyttäjä ja omistaja mukana tiedonhallintaketjussa.

## 3.2 Osa 2: Suunnittelijan opas koulurakennusten sisäilmasto-ongelmien ja kosteusvaurioiden korjaamiseen

### 3.2.1 Ilmanvaihdon korjausratkaisut

Ilmanvaihdon osalta on erikseen ohjeistettu kokonaan korjattavat ilmanvaihtojärjestelmät ja osittain säilytettävät järjestelmät. Kokonaan korjattavan ilmanvaihdon parannus- ja korjausratkaisussa käydään läpi ilmanvaihdon mitoitusperusteita, ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluohjeita, ilmanjakoratkaisuja ja päätelaitteita sekä esitellään yksi erimerkki opetustilan olosuhdesimuloinnista.

Osittain säilytettävän ilmanvaihtojärjestelmän korjaus- ja parannusratkaisussa perehdytään ilmanvaihtokanavistojen puhtauden tarkastukseen, puhdistukseen sekä tiivistämiseen. Lisäksi käsitellään tilavuusilmavirtojen tasapainotusta ja ilmavirtojen kasvattamista sekä uutuutena lumen ja kosteuden sisäänpääsyn ja suodattimien kastumisen estämistä. Ääneneristyksen osalta käydään läpi äänilähteen paikallistaminen ja poistaminen sekä äänenvaimentimen kunnostaminen.

### 3.2.2 Rakenneosien korjaukset

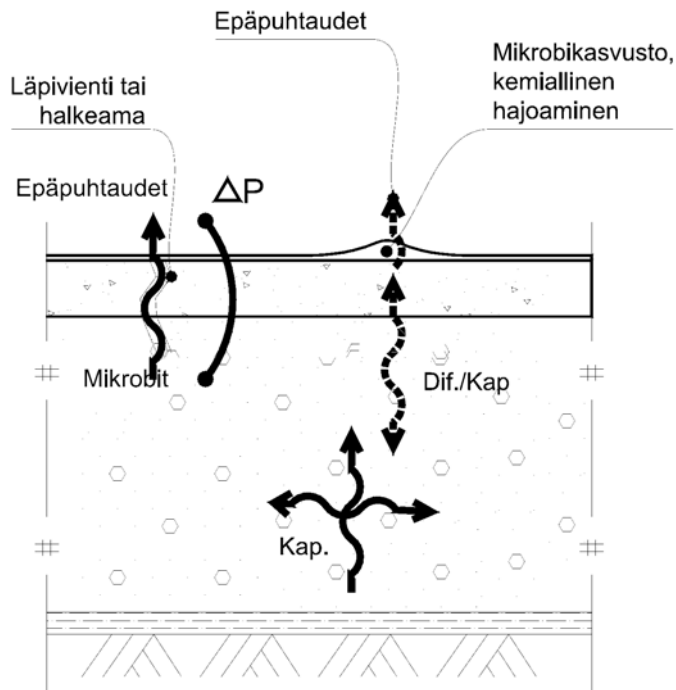
Suunnittelijan oppaassa käsitellään vain sellaisten rakenneosien korjauksia, joiden korjaamista ei aiemmin ole ohjeistettu kattavasti, esimerkiksi Ympäristöoppaassa 29 [3]. Jokaisesta seuraavasta rakenneosasta on oppaassa oma lukunsa:

- Maanvastaiset laatat
- Ryömintätilat



- Maanvastaiset tiilivuoratut kellarinseinät
- Sokkelihalkaisut ja valesokkelit
- Putkikanavat, tarkastusluukut ja rappusten alustilat
- Maata vasten perustetut väliseinät
- Levyväliseinien liitokset
- Alalaattapalkistojen eristeiden vauriot
- Ulkoseinät
- Ikkunat
- Ikkunoiden päällä olevat leukapalkit
- Yläpohjat ja vesikatot

Esitetyt korjausratkaisut noudattavat pääosin seuraavaa kaavaa: Ensin esitellään ongelma ja sen yleisyys. Mukana on yksinkertainen diagrammi rakenteen periaatteellisesta toiminnasta ja vauriomekanismista (kuva 2) sekä mahdollisesti valokuvia ongelmista. Korjausratkaisuihin pyritään esittämään eri tasoisia vaihtoehtoja A – C, joista jokaisesta esitetään kyseisen vaihtoehdon soveltuvuus, tarvittavat toimenpiteet, riskit ja edut sekä käyttöikä.



Kuva 2. Esimerkki rakenteen periaatteellisesta toiminta- ja vauriomekanismikuvasta. Maanvastainen alapohjarakenne.

Esitetyistä vaihtoehdoista A-tason korjausratkaisut ovat kevyimpiä. Niissä rakenteisiin jätetään vaurioitunutta materiaalia, mutta materiaalista syntyvien päästöjen pääsy sisäilmaan on estetty. A-tason korjauksia voi esimerkiksi käyttää silloin, kun rakennuksen laajempi peruskorjaus on odotettavissa muutamien vuosien kuluttua, mutta toiminnan jatkumisen takia jotain on tehtävä jo ennen sitä.

B-tason korjausratkaisut ovat keskiraskaita. Myös niissä vaurioitunutta materiaalia jätetään rakenteisiin, mutta materiaalista syntyvien päästöjen pääsy sisäilmaan on estetty yleensä kahdella eri tavalla. Raskaimmissa C-tason korjausratkaisuissa puolestaan poistetaan vaurioitunut materiaali kokonaan. Periaatteessa C-taso vastaa myös uusien määräysten vaatimuksia.

### 3.2.3 Erityistoimenpiteet

Oppaassa esitellään kolme erityistoimenpidettä, jotka toimivat usean korjausratkaisun osana:

- rakenteiden kuivattaminen
- tiivistäminen
- alapohjan alipaineistusohje

Rakenteiden kuivattamisessa käsitellään vaurion aiheuttajan selvittämistä, rakenteiden kuivumisen yleisperiaatetta sekä kuivumisen tehostamista.

Rakenteiden tiivistysohje ohjeistaa ilmapuotojen paikallistamista. Menetelminä esitellään silmämääräinen tarkastelu sekä merkkiaine- ja merkkisavututkimukset. Lisäksi käydään läpi itse tiivistystyö mallityökorjauksineen, esimerkkeinä annetaan betoni- ja levyrakenteen tiivistykset. Tiivistystyöstä ohjeistetaan mihin rakennekerrokseen tiivistys tulee tehdä sekä tiivistystyön tarvittava laajuus. Erityistä huomiota kiinnitetään työn laadunvarmistukseen.

Alapohjan alipaineistusohjeessa kerrotaan minkälaisia kohdeselvityksiä ja tutkimuksia rakennuksesta tulisi tehdä, jotta selviää, onko alipaineistaminen ylipäätään mahdollista. Ohjeessa annetaan myös alipaineistuksen suunnittelu- ja toteutusperiaatteita sekä ohjeistetaan työn valvontaa ja testausta.

## 4. Yhteenveto

Sisäilmaongelmaisten koulujen suuri määrä ja usein epäonnistuneet korjaukset osoittavat selkeää tarvetta ohjeistukselle sekä korjausratkaisuissa että itse korjausprosessissa. Laajan yhteistyöprojektin tuloksena on saatu aikaiseksi *Sisäilmaongelmaisten koulujen korjaaminen* [1] -opas. Se muodostuu kahdesta osasta, joissa paneudutaan kiinteistön omistajan rooliin korjausprosessissa lähtötilanneselvityksestä jälkiseurantaan, sekä suunnittelijalle tarkoitettuihin korjausratkaisuihin.

Esitetyt korjausratkaisut perustuvat pääosin kokemukseen, sillä aiheesta ei valitettavasti ole vielä riittävästi tutkimustietoa. Ratkaisujen perustaksi on kuitenkin pyritty saamaan mahdollisen laaja ja asiantunteva kokemuspohja. Kiinteistöjen omistajatahojen toivomuksesta oppaaseen on yritetty luoda eri tasoisia korjausvaihtoehtoja erilaisiin tarpeisiin, ottaen huomioon mm. korjauksen toivottu elinkaari. Koska rakennukset ovat aina yksilöllisiä, ehdotetut korjausratkaisut eivät sovellu käyttöön sellaisenaan, vaan ne toimivat suunnittelun pohjana.

Tämä opas oli alkusysäys koulujen korjaamisen ohjeistamiselle. Tästä pitää jatkaa tutkimusta, jotta tulevaisuudessa meillä olisi enemmän myös tutkimukseen perustuvia ratkaisuja. Opasta ei ole tarkoitettu lopulliseksi totuudeksi, vaan tästä on hyvä jatkaa tutkimuksia ja lisätä tietämystä, kohti entistäkin parempia korjausratkaisuja.

## Lähdeluettelo

- [1] Asikainen, V. (toim.) ja Peltola, S. (toim.). 2008. Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. Osa 1 Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnon tutkimiseen ja korjaushankkeisiin. Osa 2 Suunnittelijan opas koulurakennusten sisäilmasto-ongelmien ja kosteusvaurioiden korjaamiseen., Opetushallitus. 247 s.
- [2] Rimpelä, M. Rigoff, A.-M. Kuusela, J. ja Peltonen, H. (toim.). 2007. Hyvinvoinnin ja terveyden edistäminen peruskouluissa – perusraportti kyselystä 7.–9. vuosiluokkien kouluille. Opetushallitus ja Stakes.
- [3] Ympäristöopas 29. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus. Helsinki. Ympäristöministeriö. 79 s.



# Seurakunnallisten rakennusten kiinteistönpidollisia ja korjausteknisiä haasteita

Ville Varjo  
Turkoosi 11 Oy

## Tiivistelmä

Seurakunnat kiinteistönpitäjinä ovat ehkä suurelle osalle rakennus- ja kiinteistönpitoalankin henkilöistä suhteellisen vieraita. Seurakuntien rooli kiinteistönpidossa on kuitenkin varsin haasteellinen, sillä seurakunnat hallinnoivat paitsi merkittävää kulttuurihistoriallista rakennuskantaa niin myös erilaisia laajaa yleisöä palvelevaa muuta rakennuskantaa. Haasteellisimmat kohteet ovat arvorakennuksia kuten kirkkoja, joissa ongelmat useimmiten liittyvät massiivisiin ja tekotavaltaan vanhanaikaisiin rakenteisiin. Määrällisesti merkittävimpiä haasteita ovat seurakuntatalojen ja muiden kokoontumisrakennusten sisäilmastoasiat ja energiakysymykset. Seurakuntien rakennuskannalle on - rakennusten toteuttamisajankohdasta riippumatta - tyypillistä vaativa arkkitehtuuri, joka asettaa omat rajoitteensa ja haasteensa korjaushankkeille. Julkisina organisaatioina seurakuntien rakennuksiin liittyvät palveluiden hankinnat toteutetaan julkisista hankinnoista annetun lain mukaisesti.

## 1. Johdanto

Seurakunnat ovat merkittävä kiinteistöpitäjä suomalaisessa kiinteistönpitokentässä. Historiallisista syistä seurakuntien vanhimmat ja arvokkaimmat rakennuskohteet eli kirkot ovat paitsi seurakunnallisen toiminnan kannalta oleellisia rakennuksia, niin ne usein edustavat paikkakunnillaan usein myös vanhinta rakennuskulttuuria. Muita seurakunnallisia rakennuksia ovat kokoontumistiloina tyypilliset seurakuntatalot, joiden nimitystapa seurakunnittain vaihtelee, sekä muut toiminnalliset rakennukset kuten leirikeskukset ja huoltorakennukset. Tässä esityksessä tarkastelen lähinnä kirkkojen ja seurakuntatalojen kiinteistönpidollisia ja korjausteknisiä haasteita, koska perustellusti voi sanoa kyseisten rakennustyyppien poikkeavan melko merkittävästi esimerkiksi koulurakennuksista tai muista kokoontumistilarakennuksista.

Seurakuntien kiinteistönpidon laajuutta kuvatkoon muutama tunnusluku, sillä esimerkiksi pelkästään Tampereen kaupungin alueella toimivien seurakuntien eli Tampereen evankelisluterilaisen seurakuntayhtymän hallinnassa on 16 kirkkoa ja yli 30 seurakuntataloa tai seurakuntakotia. Tämän lisäksi seurakuntayhtymän hallinnassa on kappeleita, kerhuhuoneistoja, leirikeskuksia, huoltorakennuksia sekä muuta rakennuskantaa. Vastaavaa kiinteistökantaa löytyy asukaslukuun suhteutettuna määrällisesti kutakuinkin vastaavasti kaikista Suomen seurakunnista.

Olen tarkoituksella rajannut esityksen ulkopuolelle seurakuntien hallinnassa olevan sijoitusomaisuuskiinteistöiksi nimitettävän rakennuskannan, koska ne ovat tyypillisesti asuintaloja, asunto-osakkeita sekä liikehuoneistoja ja liikekiinteistöjä. Tarkasteltavan aihepiirin kannalta ne edustavat ominaisuuksiltaan yleisempää rakennuskantaa ja siten tämän kirjoittaja ei ole katsonut aiheelliseksi ottaa niitä mukaan tarkasteluun.

## 2. Rakennusten teknisiä ongelmakohtia

### 2.1 Kirkot rakennuksina

Kirkot muodostavat ominaisuuksiltaan ja tekniikaltaan hyvin laajan ja osin sekalaisen kokonaisuuden, vaikka joitain peruslinjoja voidaankin löyhästi määrittää:

- keskiaikaiset kivikirkot, tyypillisesti Varsinais-Suomessa, Satakunnassa ja Hämeessä
- ennen itsenäisyyden alkua rakennetut puukirkot aina 1600-luvulta alkaen, yleisiä koko maassa
- tiili- ja kivikirkot 1800 – 1900 luvuilta eri tyylisuuntien mukaan
- ensimmäiset ”nykyaikaiset” kirkot itsenäisyyden ajalta, esim. Viinikan kirkko
- sodan jälkeen rakennetut modernit kirkot 1940-luvulta nykypäivään, esim. Kalevan kirkko

Rakennusten kannalta on mielenkiintoista, että kolme ensimmäistä ryhmää ovat joko kokonaan tai lähes kokonaan kirkkoja, kun taas viimeksi mainituissa ryhmissä muiden kokoontumis- ja työskentelytilojen määrä voi olla huomattavasti suurempi kuin varsinaisen kirkkotilan laajuus.

Kiinteistönpidon ja korjaustekniikan kannalta kohteiden arkkitehtuuri sekä eri tavoin toteutettu rakennuksen suojelu asettavat tiukkoja haasteita korjaamiselle. Ennen vuotta 1917 rakennetut kirkot ovat kirkkolain nojalla suojeltuja ja uudemmat kohteet ovat yleensä suojeltuja muilla keinoilla. Monet uudemmatkin kohteet ovat arkkitehtuuriltaan valtakunnallisesti merkittäviä kohteita ja se asettaa omat haasteensa korjauksille.

### 2.2 Erinäisiä vaippaan liittyviä haasteita

Viime vuosina on alan julkaisuissa käsitelty melko runsaasti mm. Helsingissä olevan Kallion kirkon ja Tampereen Tuomiokirkon luonnonkivijulkisivun korjaustekniikka ja korjaamisessa esille tulleita havaintoja. Saatu kokemuseräinen tieto onkin arvokasta ja se on suureksi hyödyksi muissa tulevilla vastaavissa kohteissa, joissa tiilimuuri on verhoiltu melko ohuella luonnonkiviverhouksella.

Varsinainen yllätys kuitenkin löytyi v. 2007 Pyhärannasta, jonka 1909 rakennettu luonnonkivijulkisivulla varustettu kirkko osoittautuikin perusrakenteiltaan huomattavasti vanhanaikaisemmaksi kuin mainitut kohteet. Kyseisen kohteen noin 250 - 300 mm paksu luonnonkivijulkisivu olikin kantava rakennusosa, joka toimi yhdessä sisäpuolella olevan 1 – 2 kiven tiilimuurin kanssa. Muun muassa vesikaton kannattajat ja tornirakenteet tukeutuivat lähes kokonaan luonnonkivirakenteen varaan. Korjaustavaksi valittiinkin yhdessä suunnittelijan kanssa julkisivun saumojen puhdistus kauttaaltaan rapautuneesta laastista ja uudelleensaumaus – luonnollisesti Museoviraston ja Kirkkohallituksen edustajien kanssa käytyjen keskustelujen jälkeen. Sinänsä seinärakenteeseen tunkeutunut kosteus ei ollut kohteessa aiheuttanut sisäpuolelle saakka ulottuneita vaurioita lukuun ottamatta kohtia, jossa vesikaton ja vedenpoiston vauriot olivat aiheuttaneet poikkeuksellisen suurta kosteusrasitusta. Kuriositeettina mainittakoon, että kyseinen kirkko lienee eräs harvoja, ellei peräti ainoa kirkko Suomessa, jossa sopivalla myrskyllä tuuli saattaa kuljettaa merivettä julkisivuun.

Vastaavia massiivisen julkisivun saumaus- ja kosteusongelmia tavataan toisinaan myös keskiaikaisissa kivikirkkoissa, joille on tyypillistä hyvin karkeasti lohkotuista luonnonkivistä tehty varsin massiivinen seinärakenne paksuine kalkkilaastisaumoineen. Esimerkiksi Pälkäneen rauniokirkko tarjoaa erinomaisen kohteen tarkastella lähemmin keskiaikaista rakennustapaa.

Ensiarvoisen tärkeää tämän tyyppisissä rakenteissa on ylimääräisen kosteusrasituksen eliminointi ja huolehtiminen vesikaton ja veden poiston toimivuudesta ja hulevesien poisjohtamisesta seinän välittömästä läheisyydestä. Keskiaikaiset kirkot ovat lähes poikkeuksetta hautausmaan ympäröiviä ja hiekkainen maaperä on hyvin vettä läpäisevää, mutta muutamissa kirkkoissa on silti havaittu esim. sisäpuolen massiivisiin tiilipilareihin kapilaarisesti nousevan veden aiheuttamia vaurioita. Massiivisten luonnonkivirakenteiden vauriomekanismit ja korjaustavat on luonnollisesti selvitettävä tapauskohtaisesti.

Vanhojen kirkkojen vesikatemateriaaleina ovat tyypillisesti paanu, kuparipelti tai ”rautapelti” eri tavoin käsiteltynä. Lähinnä kansallisromantiikan aikakauden kirkkoissa esiintyy katteena myös poltettua tiiltä. Kaikki mainitut materiaalit ovat sinällään varsin kestäviä, mutta niiden tai yleisemmin niiden alusrakenteiden tultua käyttöikänsä loppuun on odotettavissa hankala ja kallis korjaus. Esimerkiksi paanukattoja uusittiin varsinkin 1960-luvulla huonolaatuisesta puusta tehdyillä sahatuilla paanuilla, ja kun katto vielä suojattiin puutervan sijasta kreosootilla, niin saavutettiin varsin ongelmallinen rakenne. Kreosootilla käsitellyt paanut halkeilevat, alusrakenne vaurioituu ja naulat ruostuvat poikki, jolloin katon korjaaminen on edessä. Kuparipeltikaton osalta ainakin tämän kirjoittaja on törmännyt tilanteeseen, että detaljien tekemisen osaavan peltisepän löytäminen on varsin vaikeaa.



*Kuva 1. Kuparipellillä katetun noin kaksi metriä korkean pikkutornin sisäpuolen täytemuuraus on kokonaan rapautunut 100 vuoden aikana. Korjauksena uusi muurattu runko ja korjattu alkuperäinen kuparipeltihuppu. Rakennusosa on periaatteessa hyödytön, mutta se on oleellinen osa kohteen arkkitehtuuria ja siksi korjattava.*



*Kuva 2. Alkuperäinen rautapeltikatto 1900-luvun alusta osoittautui äänekkääksi ja jo 20 vuoden iässä se katettiin poltetulla tiilellä ja taitekohdissa kuparipellillä. Sähkökemiallinen reaktio kuparin ja raudan välillä aiheutti raudan syöpymisen lähes kokonaan ja myös kuparipeltiin syöpyi reikiä. Seurauksena oli taitekohdassa olevan kattokannakkeen ja kattotuolien päiden paha lahoaminen. Kuvassa asennetaan uutta taitekohdan pääkannaketta. Huomaa päätykolmion sekarakenne; luonnonkivi, tiili ja varhainen betoniharkko, jonka tarkempi tausta ja valmistustapa jäi selvittämättä.*

### **2.3 Seurakuntatalot ja sisäilmasto**

Seurakuntatalojen rakentamisen painopiste osui 1960-70 luvuille, jolloin suomalaisessa yhdyskuntarakenteessa tapahtui muutenkin merkittäviä muutoksia mm. lähiöiden rakentamisen myötä. Seurakuntataloja on toki rakennettu jo aiemminkin, mutta varsinkin maaseudulla pappilat toimittivat seurakuntatalojen tehtävää aina 1970-luvulle saakka. Seurakuntien toiminnan kehittymisen myötä tuli tarvetta erityyppisille kokoontumistiloille ja myös toimistotiloille, mikä osaltaan selittää seurakuntatalojen rakentamishuipun ajoittumisen juuri 1960-70 luvuille. Seurakuntatalossa on yleensä varsinaisten salitilojen lisäksi pienempiä kokoontumistiloja päiväkerhoryhmille, partiolaisten tiloja, kokoustiloja sekä keittiötiloja erilaisiin tilaisuuksiin liittyvien tarjoilujen järjestämiseksi. Rakennustekniikaltaan seurakuntatalot keskimäärin vastaavat hyvin suunniteltuja saman aikakauden kouluja.



Rakentamisajankohdalle tyypillisesti rakennusten ilmanvaihto ja talotekniikka yleensä ovat nykyvaatimusten mukaan puutteellista. Ainakin tämän kirjoittaja on törmännyt teknisessä mielessä heikkoihin ja pahimmillaan jopa kokonaan toimimattomiin ilmanvaihtojärjestelmiin yllättävän uusissa kohteissa. Samankaltaisia havaintoja lienee mahdollista tehdä myös saman aikakauden koulu- ja päiväkotirakennuksissa.

Ilmanvaihdon määrä kohteissa on hyvin vaihtelevaa, koska tilaisuuksia on epäsäännöllisesti ja osanottajamäärä vaihtelee suuresti. Vastaavasti päiväkerhotiloissa on terveyssyistä myös vanhassa kohteessa saavutettava nykymääräysten mukainen ilmanvaihdon määrä, mikä harvoin onnistuu ilman järjestelmän perusteellista uusimista.

Korjausten yhteydessä on usein syytä päivittää ilmanvaihdon lisäksi koko kohteen talotekniikka mukaan lukien vanhat sähköasennukset ja valaistusteholtaan heikot valaisimet. Näin laaja korjaus on luontevaa tehdä kohteen muun perusparannuksen yhteydessä. Samassa yhteydessä voidaan parantaa kohteen energiataloutta.

## 2.4 Muita haasteita ja havaintoja

Muita huomionarvoisia seurakunnallisiin rakennuksiin liittyviä asiakokonaisuuksia ovat mm:

- kirkkojen paloturvallisuus kaikissa kirkkorakennustyypeissä ja erityisesti korkeissa kirkkorakennuksissa sekä puukirkoissa
- laitoskeittiötilojen ylläpito ja korjaaminen elintarvikehuoneistolle asetettujen ja muuttuvien vaatimusten mukaisesti
- arkkitehtonisesti tai historiallisesti arvokkaiden sisätilojen, pintojen, maalausten ja detaljien suojeleminen erityisesti talotekniikkakorjausten yhteydessä
- kohteita ympäröivän alueen asettamat erityisvaatimukset, koskee erityisesti hautausmaita
- lasten ja nuorten turvallisuuden huomiointi kerhotiloissa ja leirikeskustoissa
- vanhuksille ja liikuntaesteisille turvallisten tilojen toteuttaminen, esteettömyys ei tarkoita pelkästään kynnyksettömyyttä, vaan se tarkoittaa myös hyvää valaistusta ja selkeitä kulkureittejä

Seurakuntien suuri kiinteistöomaisuus luonnollisesti herättää kiinnostusta ja jopa intohimoja erilaisissa kiinteistösijoitusalan toimijoissa ja miksei myös muissa toimijoissa. Itsenäisinä ja riippumattomina yksiköinä seurakunnat ovat varsin selkeästi keskittyneet kiinteistöasioissaan reaalityönteeseen. Ainakaan tämän kirjoittaja ei ole törmännyt tapauksiin, joissa erilaisten spekulatiivisten rahoitusjärjestelyiden avulla seurakunta olisi lähtenyt myymään koko kiinteistöomaisuuttaan suurten voittojen toivossa. Lähempi asian tarkastelu menisi aihepiirin ulkopuolelle, mutta ajankohtaisesti voisi todeta tämän linjauksen olleen järkevä ratkaisu.

Toisena maininnanarvoisena seikkana todettakoon, että seurakunnat ovat julkisen hankintalain mukaan toimivia yksiköitä. Esimerkiksi tarjouskilpailun toteuttaminen on haasteellista tilanteissa, joissa kohteesta johtuen hyvänkään kuntotutkimuksen ja suunnittelun keinoin ei saada kaikkea tarvittavaa tietoa urakalaskennan pohjaksi. Toki tähänkin asiaan löytyy keinoja, mutta pahimmillaan niiden oikeellisuus selviää vasta markkinaoikeudessa.

### **3. Yhteenveto**

Seurakuntien kiinteistökanta on ylläpidon ja korjaamisen kannalta varsin haasteellista, vaikka toki osa rakennuksista onkin teknisessä mielessä tavanomaisia. Kirkkojen mutkikkaat ja nykYTEKNIKALLE harvinaiset rakenteet, useiden kohteiden hieno arkkitehtuuri sekä nykyvaatimusten mukaisen talotekniikan toteuttaminen kohteisiin ovat keskeisiä haasteita seurakuntien kiinteistönpidossa. Seurakuntien rakennuskannalla ja erityisesti kirkoilla on merkittävä rooli suomalaisessa yhdyskuntarakenteessa. Kirkot ovat usein paikkakuntansa vanhimpia rakennuksia, eikä meillä ole mitään syytä epäillä etteivätkö ne olisi sitä tulevaisuudessakin.

### **Lähdeluettelo**

- [1] Elävä kirkkorakennus. Schulman, S. ja Tallqvist, T. Tampereen teknillinen korkeakoulu, arkkitehtuurin osasto. Tampere 1999. 287 s.
- [2] Uskon tilat ja kuvat. Kuorikoski, A. Suomalainen teologinen kirjallisuusseura. Helsinki 2008. 384 s.

# Huokoisten laastien sekä polyamidi-kalvon VOC-yhdisteiden läpäisevyys

Janne Sievola ja Hanna Keinänen  
Vahanen Oy

## Tiivistelmä

Vanhat rakennukset ja niissä käytetyt rakennusmateriaalit sisältävät lukuisia haihtuvia terveydelle haitallisia aineita, joiden kulkeutumista sisäilmaan voidaan rajoittaa kapselointiratkaisuilla. Kapselointimateriaalien haitta-aineiden läpäisevyyttä tutkittiin laboratoriossa ns. yhden kammion menetelmällä. Tutkimuksissa selvitettiin seinärakenteiden kosteusvauriokorjauksissa käytettyjen suolankeräys-, vedensulkulaastien ja fotokatalyyttisen sisäpinnoitteen sekä välipohjissa käytetyn polyamidikalvon haitta-aineiden läpäisyä. Haitta-aineina käytettiin valuasfaltista peräisin olevaa kivihiilipikeä, josta vapautui viittä eri PAH-yhdistettä, sekä lisäksi kolmea eri MVOC-yhdistettä. Tutkittu polyamidikalvo on ns. muuttuvan kosteudenläpäisyvastuksen omaava höyrynsulkumateriaali, jonka johdosta kalvon testaus suoritettiin kuivissa sekä kosteissa olosuhteissa. Tuloksena saatiin materiaalien VOC- sekä PAH-diffuusiokertoimia sekä huokoisten laastien tutkimuksissa havaittiin adsorption vaikutus läpäisevyyteen. Vedensulkulaasti hidasti tehokkaasti tutkittujen haitta-aineiden kulkeutumista. Fotokatalyyttinen kipsilaastipinnoite pienensi rakenteiden puolelta kulkeutuvien yhdisteiden määrää useita kymmeniä prosentteja. Polyamidikalvon läpäisevyys kuivissa olosuhteissa tutkittaville yhdisteille oli lähes nolla, mutta kosteissa olosuhteissa kalvon läpäisevyys kasvoi. Saatujen diffuusiokertoimien avulla pystytään laskennallisesti määrittämään sisäilmanlaatu kapselointikorjausten jälkeen, kun kapselointi tehdään ilmatiiviksi. Tulosten avulla voidaan suunnitella kapselointikorjaustapa.

## 1. Johdanto

Vanhojen rakennusten peruskorjauksen tai käyttötarkoituksen muuttamisen yhteydessä löydetään usein erilaisia haitta-aineita ja epäpuhtauksia, jotka muodostavat riskin liittyen rakennuksen käyttöturvallisuuteen. Erilaiset epäpuhtauslähteitä sisältävät rakenteet on suunniteltava ja toteutettava siten, ettei haitta-aineista ja epäpuhtauksista aiheudu missään rakennuksen elinkaaren aikaisessa tilanteessa haittaa rakennuksen käytölle ja käyttäjien terveydelle. Epäpuhtauksien lähteet voidaan joko poistaa tai niiden kulkeutumista sisäilmaan voidaan rajoittaa kapselointiratkaisuilla. Haitallisten materiaalien poisto on kuitenkin monissa tapauksissa kohtuuttoman kallista tai lähes mahdotonta toteuttaa. Lisäksi monet vanhat rakennukset luokitellaan historiallisiksi arvorakennuksiksi, joten myös vanhoja rakenteita on syytä suojella ja säilyttää ne mahdollisimman alkuperäisessä kunnossa mahdollisuuksien mukaan. Materiaalien haitta-aineiden läpäisevyytutkimukset ovat tarpeellisia suunniteltaessa kapselointikorjauksia, koska vielä ei ole kattavaa tutkittua tietoa siitä, miten eri materiaalit läpäisevät erilaisia kemiallisia yhdisteitä.

Noiin 1800-luvun lopulta 1950-lukuun asti rakennetuissa rakennuksissa maanvastaisten rakenteiden vedeneristeenä on yleisesti käytetty kivihiilitervasivelyjä tai kivihiilipikeä sisältävää valuasfalttia. Valuasfaltti muodostaa tumman, kivikovan eristekerroksen, jonka paksuus vaihtelee parista senttimetristä yli kymmeneen senttimetriin. Kivihiiliterva ja sen tislauksjäännös kivihiilipike ovat kivihiiliteollisuuden sivutuotteita, joista vapautuu ilmaan vaarallisia

hiukkasmaisia ja haihtuvia yhdisteitä, jotka asettavat rakennuksen käyttäjien ympäristön suojaamiselle erityisvaatimuksia. Kivihiiliterva aistitaan sisäilmassa yleensä tunnusomaisena ns. ratapölkyn hajuna jo pienissä pitoisuuksissa. Kivihiilitervasivelyt sijaitsevat yleensä alapohjasta seinän alaosiin nostettuna, mutta myös maanvastaisen seinän tiilimuurausten tai luonnonkiviperustusten välissä. Valuasfalttia löydetään tyypillisesti kellareiden lisäksi myös kylpyhuoneista sekä vanhojen rakennusten välipohjista. Välipohjissa valuasfalttia on käytetty mm. rakennustyönaikaiseen säänsuojaukseen. Näistä rakenteista terveydelle haitalliset polyaromaattiset hiilivedyt, PAH-yhdisteet, höyrystyvät ja kulkeutuvat rakenteiden ilmavuotokohtien kautta ja diffuusiolla rakennusmateriaalien läpi sisäilmaan. Kivihiiliterva ja -piki ovat rakenteessa yleensä hyvin sitoutuneina, mutta lämpö ja sivelyn rikkominen lisäävät PAH-emissiota.

Maanvastaisille rakenteille tyypillisissä tiilimuurauksissa esiintyy ilmatiloja, joissa on ajoittain mikrobikasvun mahdollistavat olosuhteet. Vanhojen rakennusten välipohjissa käytetyt orgaaniset materiaalit, kuten turve, olki ja sammal ovat myös tyypillisiä mikrobiperäisten epäpuhtauksien lähteitä. Mikrobien aineenvaihduntatuotteet, MVOC-yhdisteet, pääsevät kulkeutumaan ilmavuotojen avulla ja diffuusiolla rakenteista sisäilmaan.

Maanvastaisten rakenteiden sisäpuoliset laastikorjaukset katkaisevat kapillaarista kosteutta, ovat hyvin vesihöyryä läpäiseviä sekä niillä voidaan hallita rakenteen suoloja [1]. Yleensä näitä korjauksia käytetään kohteissa, joissa rakennuksen ulkopuolinen kosteuden hallinta on teknisesti niin hankalaa, että sen toteuttaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Käytännössä korjausten on havaittu toimineen hyvin maanvastaisen rakenteiden kosteuden ja suolojen hallinnassa.

Polyamidilla saavutetaan laaja joukko hyödyllisiä ominaisuuksia. Näitä ovat mm. hyvä happitiiviys, korkea sulamispiste, kulutuskesto, sitkeys matalissa lämpötiloissa, kemiallinen kestävyys ja hyvä mekaaninen lujuus [2]. Polyamidipohjainen höyrinsulkumuovi on ns. vaihtelevan vesihöyrynvastuksen omaava höyrinsulku, joka mukauttaa vesihöyrynläpäisevyyttään ympäröivien kosteusolojen mukaan ja siten turvaa rakenteen kuivumiskyvyn [3].

Suolankeräys- ja vedensulkulaastien tutkimuksen [4] tavoitteena oli selvittää voidaanko maanvastaisten rakenteiden sisäpuolisilla laastikorjauksilla hidastaa riittävästi haitta-aineiden kulkeutumista sisäilmaan hyvän sisäilman laadun saavuttamiseksi. Polyamidikalvon tutkimuksen [5] tavoitteena oli osoittaa polyamidipohjaisen höyrinsulkumateriaalin toimivuus kapselointikorjauksissa.

## 2. Tutkimusmenetelmät ja materiaalit

Koejärjestelyä käytettiin ns. yhden kammion menetelmää [6]. Haitta-aineina tutkittiin PAH-yhdisteitä sisältävää murskattua valuasfalttia ja kolmea MVOC-yhdistettä kemikaalimesteenä (2-pentanoni, 2-pentanol ja 2-heptanoni). Tutkittavat MVOC-yhdisteet valittiin niiden kiehumispisteiden perusteella siten, että ne sijoittuivat mahdollisimman tasaisesti kaasukromatografi/massaspektrometrin tunnistamalle aineiden kiehumispisteiden välille. Tutkittavat haitta-aineet asetettiin säiliön pohjalle, josta ne haihtuivat kaasuksi säiliön ilmatilaan ja kulkeutuivat VOC- sekä PAH-diffuusiona materiaalin läpi. Diffuusiolla materiaalin läpi kulkeutuvaa haitta-aineiden määrää mitataan FLEC-laitteella.

Mittauksessa FLEC-laite asetettiin tiiviisti tutkittavaa materiaalia vasten (kuvat 1 ja 2). FLEC-kammioon syötettiin adsorbenttiin (VOC-mittauksissa Tenax TA ja PAH-mittauksissa XAD 2) kautta puhdistettu ilma, jonka ulostulovirtauksesta kerättiin ilmanäyte adsorbenttiin. VOC-näytteet analysoitiin analyysilaboratoriossa kaasukromatografi/ massaspektrometrilla [7] ja PAH-näytteet analysoitiin kaasukromatografi fluoresssi-ilmaisimella. PAH-mittauksissa ilmanäytteen määrä oli suurempi kuin VOC-mittauksissa.



Kuvat 1 ja 2. Koejärjestelyt FLEC-näytteenotosta.

Käytännössä kapselointikorjaukset tulee toteuttaa täysin ilmatiiviisti ja kun haitta-aineita sisältävään pintaan asennetaan tiivis rakennekerros, nousee haitta-ainekonsentraatio tiiviin pinnan toisella puolella maksimissaan kyllästyspitoisuuteen. Kyllästymispitoisuuden saavuttaminen riippuu mm. tutkittavan materiaalin läpäisevyydestä. Tämän johdosta tutkimuksissa pyrittiin saavuttamaan säiliön sisälle maksimipitoisuudet tutkittavia yhdisteitä, joka vastaa käytännön tilannetta, jossa haitta-ainepitoisuus on saavuttanut maksiminsa tiiviin pinnan (kapselointimateriaalin) toisella puolella.

### Suolankeräys- ja vedensulkulaastit

Ensimmäisenä materiaalina tutkittiin suolankeräyslaastia Deitermann SP, joka on mineraalipohjainen erittäin huokoinen saneerauslaasti, jossa on sulfaatinkestävää portlandssementtiä ja kalkkia käytetty sideaineena. Suolankeräyslaastin huokoisuus mahdollistaa suolan keräyksen alustasta rappauksen sisään ja päästää kosteuden kulkeutumaan vesihöyrynä rakenteen pintaan rappauksen vaurioitumatta. Toisena materiaalina tutkittiin vedensulkulaastia Deitermann HKS. Vedensulkulaasti on sementtipohjainen laasti ja siihen on lisätty hienoainesta sekä lisäaineita. Sitä käytetään katkaisemaan rakenteen kosteuden kulkeutumista niin, että materiaalin läpi pääsee vain hyvin vähäinen määrä kosteutta. Lisäksi tämä toimii täyttö- ja tasoituslaastina. Kolmantena materiaalina tutkittiin fotokatalyyttistä kipsilaastipohjaista Maxit Airfresh-sisäpinnoitetta. Tämä hajottaa epäpuhtauksia ja yhdisteitä pinnallaan valon vaikutuksesta vesihöyryksi ja hiilidioksidiksi. Pinnoitetta tutkittiin suolankeräyslaastin pinnalla.

Ennen fotokatalyyttisen pinnoitteen mittausta tuuletuksen jälkeen FLEC-laite poistettiin pinnoitteen päältä 10 minuutin ajaksi, jotta fotokatalyyysi valon vaikutuksesta käynnistyi.

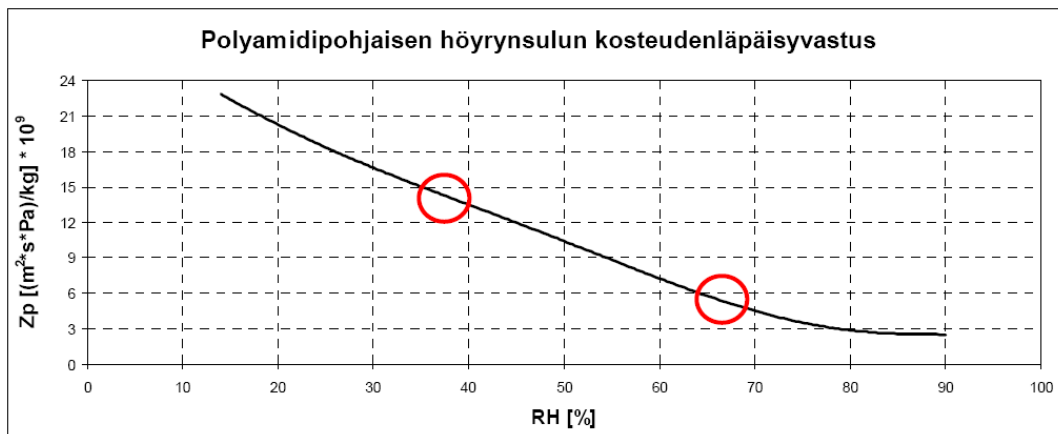
Mittauksia suoritettiin 1 kk, 2,5 kk ja 4 kk kuluttua säiliöiden sulkemisesta kuudelle rinnakkaisella koekappaleelle kutakin tutkittavaa materiaalia kohden. Mittauksien yhteydessä otettiin myös VOC-ilmanäytteitä säiliön sisältä lähtökonsentraatioiden selvittämiseksi. Viimeisen mittauksen jälkeen tehtiin PAH-materiaalianalyysit suolankeräys- ja vedensulkulaasteista materiaaliin sitoutuneiden PAH-yhdisteiden selvittämiseksi.

### Polyamidikalvo

Polyamidipohjainen höyrynsulun kosteustekninen toiminta perustuu sen kykyyn muuttaa huokostensa kokoa riippuen ympäröivistä kosteusolosuhteista. Polyamidikalvo valittiin tutkimuksen kohteeksi, koska se mahdollistaa rakenteen kuivumisen sekä tehtyjen haitta-aineiden läpäisevyyden aistinvaraisten havaintojen perusteella kalvon todettiin pitävän hajuja huomattavasti tehokkaammin kuin polyeteenikalvo.

Polyamidikalvon laboratoriomittauksia suoritettiin 1 kk ja 2 kk kuluttua säiliöiden sulkemisesta kolmella rinnakkaisella koekappaleelle kuivissa sekä kosteissa olosuhteissa. Mittauksien yhteydessä otettiin myös VOC- sekä PAH-ilmanäytteitä säiliön sisältä lähtökonsentraatioiden selvittämiseksi.

Mittaushetkellä polyamidikalvon suhteelliset kosteudet olivat kuivan säiliön tapauksessa 35-40 % ja kostean säiliön tapauksessa noin 65-70 %. Kuvassa 3 on esitetty polyamidikalvon kosteudenläpäisyvastus mittaushetkellä.



Kuva 3. Polyamidipohjaisen höyrynsulkukalvon kosteudenläpäisyvastus [ $m^2 \cdot s \cdot Pa / kg \cdot 10^9$ ] mittaushetkellä (punaiset alueet). Künzel (1996) on määrittänyt kuppikokeella tutkittavan höyrynsulun kosteudenläpäisyvastuksen suhteellisen kosteuden funktiona [8].

### 3. Tutkimustulokset

Materiaalien diffuusiokertoimet laskettiin tutkittaville PAH- sekä MVOC-yhdisteille laboratoriossa koesäiliöiden sisältä mitattujen pitoisuuksien sekä tutkittavien materiaalien pinnalta FLEC-menetelmällä mitattujen pintatuottojen avulla. Eri materiaalien mitattuja pintatuottoja ei voida suoraan verrata toisiinsa, koska haitta-aineiden lähtökonsentraatiot materiaalien välillä olivat erisuuret johtuen läpäisevyseroista.

#### Suolankeräys- ja vedensulkulaastit

Kolmannen mittauksen (4 kk) pintatuottojen ja säiliöiden konsentraatioiden mukaan lasketut materiaalien ja tutkittujen yhdisteiden diffuusiokertoimet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Materiaalien ja yhdisteiden väliset diffuusiokertoimet.

Mitattu yhdiste	Suolankeräyslaasti	Vedensulkulaasti
Naftaleeni	$307,5 \times 10^{-9}$	$16,6 \times 10^{-9}$
2 –Pentanoli	$511,1 \times 10^{-9}$	$22,4 \times 10^{-9}$
2 –Heptanoni	$732,7 \times 10^{-9}$	$28,9 \times 10^{-9}$
2 -Pentanoni	$530,9 \times 10^{-9}$	$25,6 \times 10^{-9}$

Materiaalinäytteen PAH-analyysissä suolankeräysrappaukseen sitoutui naftaleenia 4,1 mg/kg ja 16 PAH-yhdisteen kokonaispitoisuudeksi mitattiin 6,3 mg/kg. Vedensulkulaastiin sitoutui naftaleenia 15 mg/kg ja 16 PAH-yhdisteen kokonaispitoisuudeksi mitattiin 20 mg/kg.

Taulukossa 2 on esitetty fotokatalyyttisen kipsilaastipinnoitteen läpi kulkeutuneiden yhdisteiden väheneminen suhteessa suolankeräyslaastiin ilman pinnoitetta. Ensimmäisessä mittauksessa materiaaliin kohdistui ikkunasta luonnonvaloa, joka nosti reaktiivisuutta. Toisessa ja kolmannessa mittauksessa koekappaletta ei altistettu luonnonvalolle, joten valon voimakkuus oli pienempi ja säiliön lähdepitoisuus pienempi kuin ensimmäisessä mittauksessa.

Taulukko 2. Fotokatalyyttisen kipsilaastipinnoitteen vaikutus yhdisteiden läpi kulkeutumiseen suhteessa suolankeräyslaastiin ilman pinnoitetta.

Mitattu yhdiste	Fotokatalyyttinen reaktiivisuus (%), (+) hajoaminen, (-) ei hajoamista		
	Mittaus 1 (1 kk)	Mittaus 2 (2,5 kk)	Mittaus 3 (4 kk)
Naftaleeni	36,2 %	18,5 %	32,5 %
2 –Pentanoli	-60,5 %	-23,8 %	-108,1 %
2 –Heptanoni	41,3 %	28,0 %	44,4 %
2 -Pentanoni	32,4 %	57,7 %	31,5 %

### Polyamidikalvo

VOC- sekä PAH-mittauksissa havaittiin, että valuasfaltista haihtui viittä eri PAH-yhdistettä, jotka kaikki pystyttiin havaitsemaan myös VOC-analyysissä. Mitattujen suurimpien pintatuottojen ja säiliöiden pitoisuuksien perusteella määritetyt polyamidikalvon diffuusiokertoimet tutkituille yhdisteille on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Polyamidikalvon diffuusiokertoimet [ $m^2/s$ ] tutkitaville PAH sekä MVOC -yhdisteille.

Mitattu yhdiste	Kuiva (RH 35-40 %)	Kostea (RH 65-70 %)
Naftaleeni	$0,0694 \times 10^{-12}$	$84,5 \times 10^{-12}$
Asenaftteeni	$7,51 \times 10^{-12}$	$313 \times 10^{-12}$
Fluoreeni	0	$278 \times 10^{-12}$
Fenantreeni	0	$139 \times 10^{-12}$
Antraseeni	0	0
2 –Pentanoli	$0,118 \times 10^{-12}$	$54,4 \times 10^{-12}$
2 –Heptanoni	0	$32,4 \times 10^{-12}$
2 -Pentanoni	$0,188 \times 10^{-12}$	$42,8 \times 10^{-12}$

## 4. Tulosten tarkastelu ja käytännön sovellutukset

Määritettyjen diffuusiokertoimien avulla pystytään arvioimaan haitta-ainelähteen ja korjauskerrosten vaikutusta tilan sisäilmaan. Kapselointimateriaalin läpi diffuusiolla siirtyvien yhdisteiden muodostama sisäilmakonsentraatio voidaan laskea seuraavalla kaavalla olettaen ilma täysin sekoittuneeksi:

$$C_{\text{sisäilma}} = \frac{G}{n \cdot V} = \frac{C_{\text{lähde}}}{\Delta x_1 / D_1 + \Delta x_2 / D_2} \frac{1}{n \cdot V} \quad (1)$$

missä	$C_{\text{sisäilma}}$	= sisäilman konsentraatio ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
	$G$	= haitta-ainetuotto ( $\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ )
	$n$	= ilmanvaihtoluku (1/h)
	$C_{\text{lähde}}$	= lähteen konsentraatio ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
	$\Delta x_i$	= materiaalikerroksen paksuus (m)
	$D_i$	= diffuusiokerroin materiaalille ja yhdisteille ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	$V$	= huonetilan tilavuus ( $\text{m}^3$ ) [9]

Laskelmissa ilmanvaihtokertoimeksi oletettiin 0,2-0,5 1/h. Suomen rakennusmääräyskokoelma [10] esittää asuntojen ilmanvaihdolle yleisen vaatimuksen 0,5 1/h. Kuitenkin korjausten jälkeen tästä tavoitteesta usein jäädyään ja ilmanvaihtuvuus on välillä 0,2-0,5 1/h [11].

### Suolankeräys- ja vedensulkulaastit

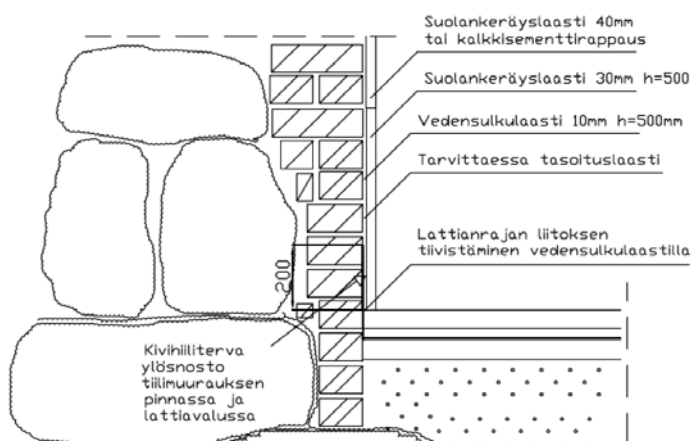
Mitatuista pintatuotoista havaittiin, että suolankeräyslaastin pintatuotto väheni ensimmäisen ja toisen mittauksen välillä 47 % ja tuotto tasaantui viimeistään 2,5 kuukauden jälkeen.

Vedensulkulaastin pintatuotto kasvoi kokeen edetessä. Vedensulkulaastikokeessa lähdekonsentraatioksi naftaleenilla saatiin  $8600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Fotokatalyyttinen kipsilaasti vähensi naftaleenin läpikulkeutuvuutta muutamien kymmenien prosenttien tehokkuudella verrattuna suolankeräyslaastiin ilman pinnoitetta. MVOC -yhdisteiden tapauksessa ero oli useita kymmeniä prosentteja. Tuloksiin vaikutti valon voimakkuus, yhdisteiden kemialliset ominaisuudet ja pitoisuus sekä koemenetelmä.

Haitta-aineiden sisäilmapitoisuuden ratkaisemiseksi valittiin pieni mallihuone  $40 \text{ m}^3$  ( $4\text{m} \cdot 4\text{m} \cdot 2,5\text{m}$ ). Haitta-aineiden oletetaan sijaitsevan kahdessa ulkoseinässä. Tarkastellun PAH-yhdisteen eli naftaleenin sisäilmapitoisuuden maksimiarvoksi asetetaan  $2-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  suositusten [12,13] mukaisesti (sisäilmamittauksissa naftaleenin maksimiarvona pidetään  $2-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Mallihuoneessa on kivihilitervasively, joka on nostettu 200 mm lattiasta seinälle. Sisäpuolisena kosteusvauriokorjauksena on 10 mm vedensulkulaasti 500 mm korkeudelle asti ja 30 mm suolankeräyslaastia (kuva 4). Kaavan 1 mukaan sisäilmapitoisuudeksi 0,5 ilmanvaihtokertoimella saadaan  $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja 0,2 ilmanvaihtokertoimella  $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Käytännössä kivihilitervan lähdekonsentraatio on pienempi kuin tarkastelussa käytetty ( $8600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



Kuva 4. Korjausesimerkki sisäpuolisesta laastikorjauksesta 200 mm kivihilitervaa ylösnostossa.

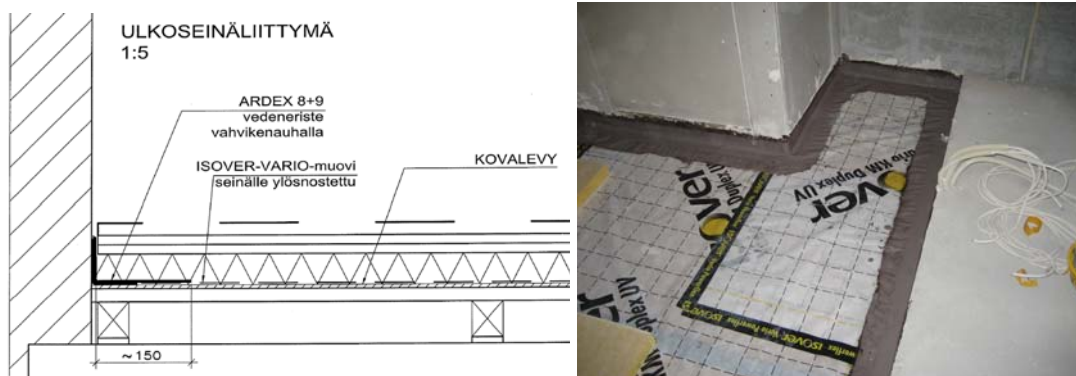


## Polyamidikalvo

Mittaukset osoittivat, että pitoisuudet eivät merkittävästi muuttuneet 1 kk ja 2 kk mittauksen välillä kuivan säiliön mittauksissa, mutta kostean säiliön mittauksissa kalvon läpäisevyys vaikutti säiliön pitoisuuteen. Kuivan säiliön mittauksissa naftaleenin pitoisuus säiliön sisällä oli lähes vakio  $20\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  ensimmäisellä (1 kk) ja toisella (2 kk) tarkastelujaksolla. Kostean säiliön mittauksissa ensimmäisessä mittauksessa säiliön naftaleenin pitoisuus oli  $12\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja pitoisuus pieneni arvoon  $8\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  toisessa mittauksessa.

Tulosten perusteella nähdään, että kuivissa olosuhteissa polyamidipohjainen höyrinsulku soveltuu erittäin hyvin kapselointimateriaaliksi. Suhteellisen kosteuden kasvaessa myös polyamidipohjaisen höyrinsulkumateriaalin haitta-aineiden läpäisevyys kasvaa. Läpäisevyyden kasvu perustuu kalvon huokosten laajentumiseen suhteellisen kosteuden vaikutuksesta.

Haitta-aineiden sisäilmapitoisuuden ratkaisemiseksi valittiin mallihuone  $29\ \text{m}^2$  (tilavuus  $116\ \text{m}^3$ ). Haitta-aineiden oletetaan sijaitsevan joko koko lattiassa tai lattiassa sekä katossa. Tarkastellaan tilannetta, jossa polyamidipohjainen höyrinsulku on asennettu suoraan valuasfaltin päälle ja naftaleenin konsentraatio kapselointimateriaalin toisella puolella on noussut korkeaksi. Kaavan 1 mukaan sisäilmapitoisuudeksi  $0,2$  ilmanvaihtokertoimella saadaan  $0,125\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja  $0,5$  ilmanvaihtokertoimella  $0,05\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , kun valuasfalttia on koko lattiassa. Naftaleenin sisäilmapitoisuudeksi  $0,2$  ilmanvaihtokertoimella saadaan  $0,25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja  $0,5$  ilmanvaihtokertoimella  $0,1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , kun valuasfalttia on koko lattiassa ja katossa. Kuvat 5 ja 6 on korjausesimerkki lattiarakenteen kapseloinnista polyamidikalvolla.

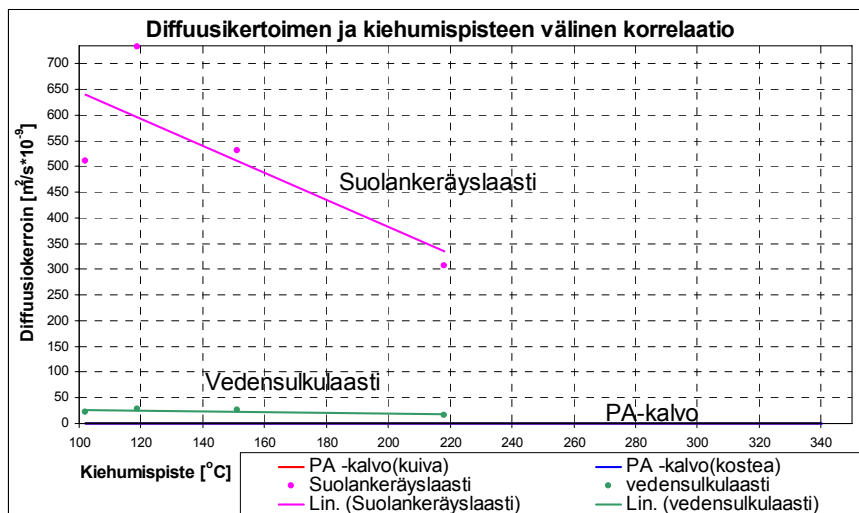


Kuvat 5 ja 6. Korjausesimerkki haitta-aineita sisältävän välipohjan kapseloinnista polyamidipohjaisella höyrinsulkukalvolla (ISOVER VARIO-muovi). Kalvo tulee liittää ilmatiiviisti kapseloitavaan pintaan.

## 5. Johtopäätökset

Esitetyt tulokset koskevat vain testattuja tuotteita. Yhden kammion menetelmän avulla määritetyt diffuusiokertoimet eivät ole tarkkoja, koska lähdesäiliön VOC- sekä PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat niin suuria ja mittaukset toteutettiin pistokoeluoontoisesti, joten virherajoja ei pystytty määrittämään. Sisäilman laatusovelluksissa pitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä säiliön konsentraatioon verrattuna johtuen mm. valuasfaltin pinnan kuivumisesta sekä muista rakennekerroksista. Näissä laboratoriokokeissa käytetty säiliömenetelmä antaa tutkittaville materiaaleille suuremman diffuusiokertoimen, koska diffuusiokerroin on riippuvainen tutkittavan yhdisteen pitoisuudesta. Tämän takia näissä tutkimuksissa esitetyt tulokset ovat vain arvioita diffuusiokertoimesta, mutta arviot ovat kuitenkin varmallalla puolella sovellettaessa todellisiin korjauskohteisiin.

Tutkimuksessa keskityttiin muutamaani eri yhdisteeseen, mutta tutkittuja kapselointikorjauksia voidaan soveltaa myös muihinkin yhdisteisiin tutkitulla kiehumispistevälillä. Meininghaus ja Uhde (2002) tekivät vastaavanlaisen tutkimuksen ja löysivät yhdisteiden kiehumispisteen ja läpäisevyyden välisen korrelaation, jonka avulla pystytään arvioimaan myös muiden yhdisteiden läpäisevyyttä. Kuvassa 7 on esitetty tutkimuksissa tehtyjen tulosten diffuusiokerroimien ja kiehumispisteiden välinen korrelaatio.



Kuva 7. Diffuusio- ja kiehumispisteen välinen korrelaatio. Polyamidikalvon tapauksessa diffuusiokerroin on lähes nolla.

### Suolankeräys- ja vedensulkulaastit

Suolankeräyslaastin pintatuoton pieneneminen naftaleenilla johtuu PAH-lähdetuoton vähentymisestä ajan kuluessa, kun läpäisevä materiaali päästää yhdisteitä poistumaan säiliöstä. Tämä kuvaa hyvin käytäntöä, jossa rakenteessa kauan vaikuttaneiden haitta-aineiden emissio ja kulkeutuminen sisäilmaan on vähentynyt merkittävästi. Kokeessa tapahtumaa tehostaa PAH-lähteen rajoittuminen ilmatilaan sekä myös PAH-lähteen reaktiopinta-alan suuruus valuusfaltin murskauksen takia. Suolankeräyslaastien VOC-diffuusio- ja kiehumispisteen korrelaatio voidaan käyttää lähes yhtä huokoisten materiaalien läpäisevyyden arvioimisessa.

Vedensulkulaastin pintatuoton kasvu kokeen aikana johtuu yhdisteiden adsorboitumisesta materiaalin huokosiin. Ensimmäisen mittausjakson (1 kk) aikana adsorptio materiaaliin hidasti huomattavasti yhdisteiden läpäisyä. Materiaalin adsorptiokapasiteetin täytyessä mikrohuokoisen vedensulkulaastin läpäisevyys kasvaa. Materiaalista otetun PAH-analyysin mukaan siihen sitoutuneiden PAH-yhdisteiden pitoisuus oli melko suuri. Maksimiläpäisevyyden selvittäminen vaatii jatkomittauksia. Käytännössä, kun rakenteita päällystetään uusilla materiaaleilla, voi viedä vuosia ennen kuin haitta-aineet kyllästävät uudet materiaalit ja vasta tämän jälkeen tuotto sisäilmaan voi nousta haitalliseksi.

Määritettyjen diffuusio- ja kiehumispisteen korrelaation perusteella tutkittua vedensulkulaastia voidaan pitää melko hitaasti PAH-yhdisteitä läpäisevänä. Myös MVOC-yhdisteiden kulkeutuminen rakenteesta hidastuu huomattavasti käytettäessä vedensulkulaastia. MVOC-yhdisteen 2-pentanonin pitoisuus säiliössä väheni nopeasti jo kokeen alussa, joten sen koetulokset eivät ole realistisia.

Vedensulkulaastia voidaan käyttää rakenteen sisältämien PAH-yhdisteiden hallintaan huomioimalla haitta-ainelähteen pinta-ala, lähteen ja sisäilman välissä olevat vanhat rakennekerrokset, huonetilavuus sekä ilmanvaihto. Ilmanvaihto on tärkeä sisäilman puhdistaja.

Erittäin heikolla ilmanvaihdolla on hyvin hankalaa pitää sisäilman laatu hyvänä, jos rakenteista pääsee haitta-aineita sisäilmaan.

Fotokatalyyttisella kipsipinnoitteella rappausten pinnalla voidaan vähentää haitta-ainetuottoa sisäilmaan. Muissa tutkimuksissa todettuja sivureaktiotuotteita ei tällä koemenetelmällä havaittu.

### **Polyamidikalvo**

Laboratoriotutkimukset osoittivat, että polyamidipohjainen höyrynsulkumateriaali toimii kapselointimateriaalina etenkin kuivissa olosuhteissa. Polyamidikalvon käyttö korkeassa suhteellisessa kosteudessa vaatii vielä lisätutkimuksia tilanteissa, joissa suhteellinen kosteus kasvaa yli 70 %:iin. Tutkimuksessa mitatut diffuusiokertoimet polyamidikalvon tapauksessa kuivissa olosuhteissa ovat lähellä nollaa tutkituilla yhdisteillä, joiden kiehumispisteet ovat välillä 102–340 °C ja moolimassat 86-178 g/mol (vrt. vedellä kiehumispiste 100 °C ja moolimassa 18 g/mol).

Kapselointikorjauksia suunniteltaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteen kuivumiskyvyn heikkenemiseen hallitsemattomien ilmapuotojen poistumisen sekä uusien diffuusiovastusta kasvattavien rakennekerrosten lisäämisen seurauksena. Tutkimuksen kohteena oleva polyamidikalvo soveltuu hyvin kapselointimateriaaliksi mm. välipohjiin, koska sillä on hyvä diffuusiovastus haitta-aineille etenkin kuivissa olosuhteissa. Lisäksi kalvo mahdollistaa kosteammissa olosuhteissa rakenteen kuivumisen.

## **6. Yhteenveto**

Mittauksien avulla määritettiin korjausmateriaalien VOC- sekä PAH-diffuusiokertoimet, joista laskennallisesti arvioitiin materiaalien soveltuvuutta kapselointiin. Tutkittavia huokoisia laasteja olivat suolankeräys- sekä vedensulkulaastit. Tutkimusten mukaan PAH-lähteitä voidaan hallita suolankeräysjärjestelmän vedensulkulaastilla huomioiden ilmanvaihdon merkitys. Häirityn kivihiilipikimateriaalin PAH-emission tilavuuspitoisuudeksi saatiin laastien tutkimuksissa naftaleenilla 8600 µg/m<sup>3</sup>. PAH-lähdepitoisuus pienentyi läpäisevällä materiaalilla 47 % 2,5 kk jälkeen lähteen rajoituessa ilmaan. Adsorptio hidasti huomattavasti vedensulkulaastin läpäisyä 1 kk aikana. Tutkitun PAH-yhdisteen, naftaleenin, adsorptio materiaaliin oli melko suuri 20 mg/kg. Vedensulkulaastin VOC-läpäisevyys oli melko hidasta, mutta kasvoi mittauksen aikana adsorption vaikutuksesta. Maksimipintatuoton selvittäminen vaatii lisämittauksia. Fotokatalyyttinen kipsilaastipinnoite pienentää tutkittujen haitta-aineiden pintatuottoa. Sitä voidaan soveltaa yhtenä apukorjausmenetelmänä haitta-aineiden sisäilmapitoisuuksien hallitsemisessa.

Toiset vastaavanlaiset tutkimukset suoritettiin polyamidikalvolla. Polyamidikalvon tutkimukset osoittivat kalvon soveltuvan hyvin kapselointimateriaaliksi mm. välipohjiin, sillä se on suhteellisen läpäisemätön haitallisille VOC- sekä PAH-yhdisteille säilyttäen kuitenkin rakenteen kuivumiskyvyn. Materiaalin diffuusiokerroin tutkituille haitta-aineille on lähes nolla. Diffuusiokerroin kuitenkin kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa, sillä materiaalihuokosten koko muuttuu suhteellisen kosteuden vaikutuksesta. Tässä tutkimuksessa mitattiin diffuusiokertoimia 35-40 %:n sekä 65-70 %:n suhteellisessa kosteudessa. Tutkimustulosten perusteella voidaan olettaa materiaalin haitta-aineiden läpäisevyyden kasvavan entisestään suhteellisen kosteuden noustessa yli 70 %:iin.

## Lähdeluettelo

- [1] Palviainen, T. 2007. Maanvastaisten rakenteiden epäpuhtauksien ja kosteuden hallinta sisäpuolisilla rappaus- ja tiivistyslaastikorjauksilla. Sisäilmayhdistys ry. Sisäilmastoseminaari 2007. Espoo. s.103-108
- [2] Turunen O., Pakkauskalvoihin käytettävät muovit. Muovikalvot ja kalvopakkaustekniikka, Julkaisu 76-88, 1980, s. 7-8
- [3] Kuenzel H. M., More moisture load tolerance of construction assemblies through the applications of a smart vapour retarder, Clearwater Beach, Published in ASHRAE Conference Proceedings Thermal Envelopes VII, 1998, p 129
- [4] Sievola, J. 2008. Kosteusvaurioituneiden maanvastaisten seinärakenteiden sisäpuolisten laastikorjausten vaikutus sisäilman laatuun. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. s. 102
- [5] Keinänen, H. 2009. Polyamidipohjaiset kapselointiratkaisut haitta-aineiden ja epäpuhtauksien torjunnassa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo.
- [6] Meininghaus, R. & Uhde, E., Diffusion studies of VOC mixtures in a building material, Indoor air 2002, nro. 12, s. 215-222
- [7] ISO 160006: 2004. Indoor air Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID
- [8] Künzel H. M., Humidity controlled vapour retarders reduce risk of moisture damages, Published in Building Physics in the Nordic Countries, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Symposium, Volume 2, 1996, pp 447-454
- [9] Nevander, L.E & Elmarsson, B. 1994. Fukt handbook. Svensk Byggtjänst och författarna. Stockholm. s.358
- [10] SRMK D2. 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto - Määräykset ja ohjeet 2003. Ympäristöministeriö. Helsinki. s. 19
- [11] Kurnitski, J. & Eskola, L. & Palonen, J. 1997. Pientalojen ilmanvaihdon parannustarpeet. Sisäilmayhdistys ry. Sisäilmastoseminaari 2007. Espoo. s.265-270
- [12] Euroopan ympäristökeskus 2003. Contaminants in Soil: Collation of Toxicological Data and Intake Values for Humans. Naphthalene. Environment Agency, Rio House, Water side Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol. Saatavissa (22.1.2009): [http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/naphthal\\_old\\_approach\\_2028758.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/naphthal_old_approach_2028758.pdf)
- [13] Saksan ympäristöministeriön sisäilmakomitea (Kommission innenraumlufthygiene (IRK)) internet sivut (2.3.2009): [www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/) sekä EPA (U.S. Environmental Protection Agency) internetsivut (2.3.2009): [www.epa.gov/iris/subst](http://www.epa.gov/iris/subst)

## Kostuneen rakenteen kuivatus mikroaaltokuivaimella

Ilkka Tikkanen ja Virpi Ranta  
Elmatec Oy

### Tiivistelmä

Hankkeessa tutkittiin vedellä kapillaarisesti kyllästyneen betonilaatan mikroaaltokuivausta. Tutkimus kohdistui tasomaiseen, kooltaan kuivattavaa aluetta pienempään kuivaimiin. Tutkimushanke toteutettiin vuosina 2008 - 2009 Teknillisen korkeakoulun rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laboratoriossa. Koekappaleina käytettiin vanhoista betonirakenteista purettuja välipohjalaattoja ja väliseiniä. Kuivauskokeissa viiteen betonilaataan kohdistettiin kaksi 30 tai 60 minuutin kuivausjaksoa mikroaaltoteholtaan 700 W kuivaimella. Kuivausjaksojen välissä pidettiin 60 minuutin tauko. Mikroaaltokäsittely kasvatti kuivumisnopeuksia selvästi kaikissa koekappaleissa. Tarkasteltaessa kahteen suuntaan kuivuvia koekappaleita, olivat kuivumisnopeudet kuivausjaksojen aikana 210 mm paksuissa koekappaleissa 11 - 25 -kertaisia verrattuna kuivumisnopeuteen, kun lämpötilat koekappaleissa olivat tasaantuneet takaisin huonelämpötilan tasolle. Vastaavasti 80 mm paksussa koekappaleessa kuivumisnopeudet olivat 7 - 8 -kertaisia ja 160 mm paksussa koekappaleessa 3 - 6 -kertaisia. Yhteen suuntaan kuivuvassa 80 mm paksussa koekappaleessa kuivumisnopeudet olivat 14 - 23 -kertaisia. Laboratoriotutkimuksessa käytettiin rakennekoekappaleita, minkä vuoksi kappaleet olivat huonosti keskenään vertailtavissa. Kuivumisnopeudet eivät ole yleistettävissä, mutta ne antavat suuruusluokkatietoa mikroaaltosäteilyn vaikutuksesta kuivumisnopeuteen.

### 1. Johdanto

Tavallisessa kuivauksessa lämpö siirtyy yleensä materiaalin pinnalta sen sisäosiin. Pinnan kuivuttua kosteus siirtyy pääasiassa diffuusiolla hitaasti pintaan. Mikroaaltosäteily sen sijaan tunkeutuu helposti kuivan pinnan läpi materiaalin märkiin sisäosiin. Tätä mikroaaltojen ominaisuutta voidaan mikroaaltokuivauksessa hyödyntää: mikroaaltosäteily voidaan kohdistaa tehokkaasti betonissa olevaan kosteuteen. [3] Sisäisestä lämmönkehityksestä johtuen kappaleessa alkaa nopeasti muodostua höyryä, mikä edelleen synnyttää painetta materiaalin huokosissa. Mikroaaltokuivauksessa kosteuden siirtyminen tapahtuu painegradientin, ei konsentraatiogradientin vaikutuksesta, toisin kuin tavallisessa kuivauksessa. [4] Mikroaaltokuivauksessa suurimmat lämpötilat esiintyvät materiaalin sisällä. Lämpötilagradientin suunta on vastakkainen tavalliseen kuivaukseen verrattuna, mikä edelleen nopeuttaa kuivausta. [1]

Suurin osa kosteudesta höyrystyy ennen kappaleesta poistumistaan. Mikäli kuivattava kappale on alun perin hyvin märkä ja paine kappaleen sisällä nousee hyvin nopeasti, voi kosteus poistua kappaleesta myös nesteinä. Mitä korkeampi lähtökosteuspitoisuus, sitä suurempi painegradientin vaikutus kokonaisuudessaan poistoon on. [4]

Mikroaaltokuivausta käytetään tällä hetkellä pääasiassa kapillaarisen kosteuden nousun estämiseen tarkoitettujen injektointimenetelmän yhteydessä. Tulevaisuudessa mikroaaltokuivauksen painopistettä markkinoilla on tarkoitus suunnata yhä enemmän vesivahinkokohteisiin.

Mikroaaltotekniikasta ja kuivaimien suuresta tehotehyydestä johtuen mikroaaltokuivaimen käyttötapa on aktiivinen, toisin sanoen kuivainta käytettäessä kuivain vaatii jatkuvaa valvontaa ja siirtelyä. Mikroaaltokuivaus ei siten välttämättä kilpaile perinteisten kuivausmenetelmien markkinoista, vaan mikroaaltokuivaus tarjoaa etuja nopeaa kuivausta vaativiin kohteisiin.

## 2. Mikroaaltokuivauksen tutkimus TKK:lla

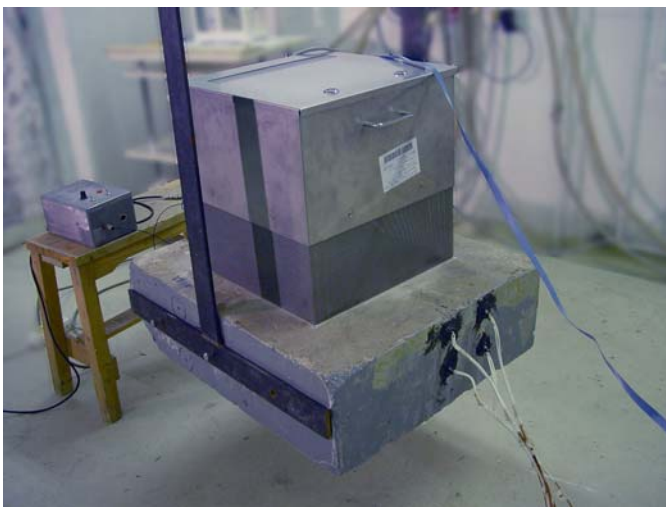
### 2.1 Tutkimuksen tavoite, käytetyt koekappaleet ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten betoni kuivuu mikroaaltokuivauksessa, miten nopeaa kuivuminen on ja mitkä tekijät kuivaukseen vaikuttavat. Tutkimus rajattiin vanhoihin betonirakenteisiin, joissa ei ollut lämmöneristeisiin rajoittuvia pintoja. Valinta kohdistettiin vanhoihin betonirakenteisiin, jotta laboratoriokoekappaleet vastaisivat mahdollisimman hyvin todellisia kenttäkohteiden rakenteita ja huokosominaisuuksiin vaikuttavat hydrataatioreaktiot olisivat pääosin päätyneet. Koekappaletyypit on esitetty taulukossa 1. Kaikki koekappaleet olivat raudoitettuja.

*Taulukko 1. Kokeessa käytettyjen koekappaleiden rakennekuvaus.*

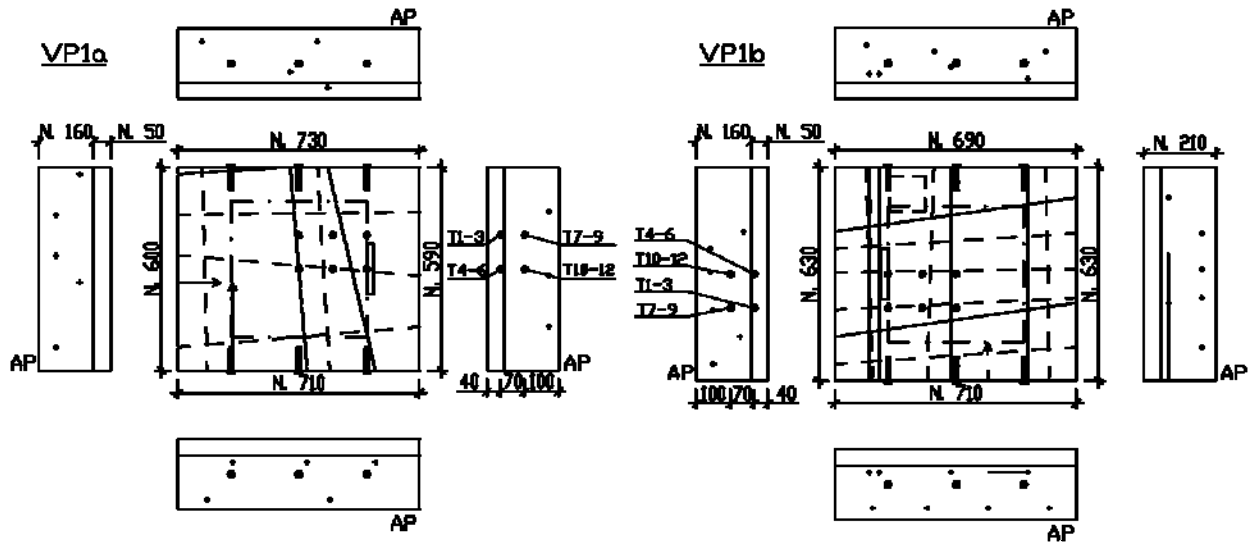
Rakennetyyppi	Tunnus	Paksuus	Tarkennus
välipohja	VP1	n. 210 mm	160 mm kantava massiivilaatta, jonka päällä n. 50 mm pintavalu
pintalaatta	VP2	n. 80 mm	EPS-eristeen päälle valettu pintalaatta (eriste poistettu)
väliseinä	VS1	n. 160 mm	kantava väliseinä rakenne

Betonin kuivumista mikroaaltokuivatuksen aikana havainnoitiin seuraamalla laatan kuivumisnopeutta sekä lämpötilan nousua laatasta. Kuivumisnopeutta eli koekappaleen kokonaismassassa tapahtuvaa muutosta mitattiin kattovaakaan liitetyllä veto- ja puristusanturilla TCLP-500KA (Tokyo Sokki Kenkyujo CO., Ltd), jonka kapasiteetti oli 500 kg. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 1.

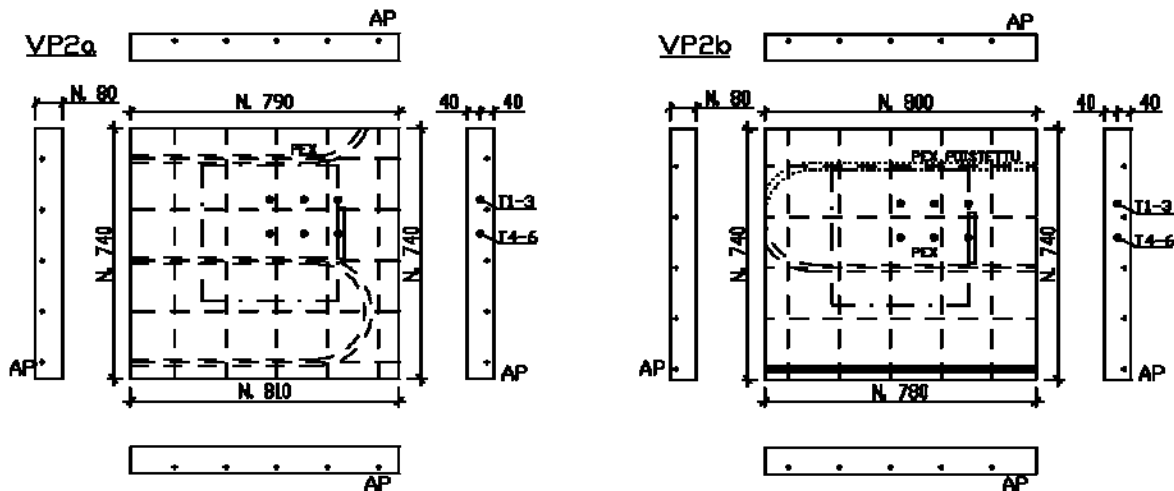


*Kuva 1. Mittausjärjestely mikroaaltokuivauskokeessa. Koekappale roikkuu kattovaa'assa teräksisen kehikon varassa. Kuivain on laatan keskiosassa ja sitä käytetään etäohjauksella. Lämpötila-anturit ovat kuvassa alhaalla oikealla.*

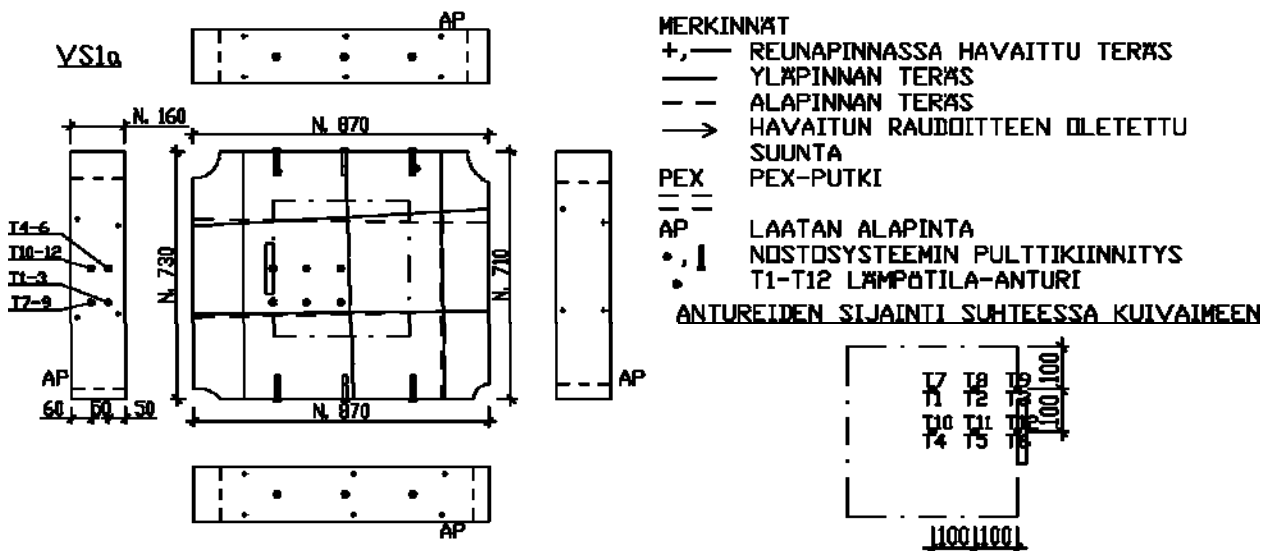
Lämpötilaa mitattiin koekappaleiden VP1a, VP1b ja VS1a osalta 12 ja koekappaleiden VP2a ja VP2b osalta kuudesta eri pisteestä. Lämpötila-anturit sijoitettiin siten, että mittauspisteet olivat kussakin koekappaleessa laatan tasossa kuivaimen nähden samat. Lämpötila-antureina käytettiin termoelementtejä. Antureiden ja kuivaimen sijainti sekä koekappaleiden rauditus on esitetty kuvissa 2 - 4.



Kuva 2. Koekappaleiden VP1a ja VP1b rauditus ja lämpötila-antureiden sijainti.



Kuva 3. Koekappaleiden VP2a ja VP2b rauditus ja lämpötila-antureiden sijainti.



Kuva 4. Koekappaleen VS1a raudoitus ja lämpötila-antureiden sijainti. Oikealla kuvissa 2-4 käytetyt merkinnät ja antureiden sijainti suhteessa kuivaimeen.

Kuivauskokeissa tutkittiin pääsääntöisesti tapausta, jossa laatta kuivuu kahteen suuntaan. Erikoistapauksena tutkittiin työmaalla usein vastaantulevaa tapausta, niin sanottua peltikylpyhuonetta, jossa peltikasetin päälle on valettu ohut betonilaatta. Peltikylpyhuone on yhteen suuntaan kuivuva rakenne. Tutkimuksessa rakenne toteutettiin kiinnittämällä koekappaleen VP2b alapintaan teräsohutlevy. Kuivuminen koekappaleiden sivupinnoista estettiin epoksinpinnoitteella.

Tutkimuksessa käytettiin tasokuivainta, jonka ulkomitat olivat noin 400 x 400 mm<sup>2</sup>. Käytetyn mikroaaltokuivaimen mikroaaltoteho oli noin 700 W. Kuivauskokeissa laitetta käytettiin täydellä teholla.

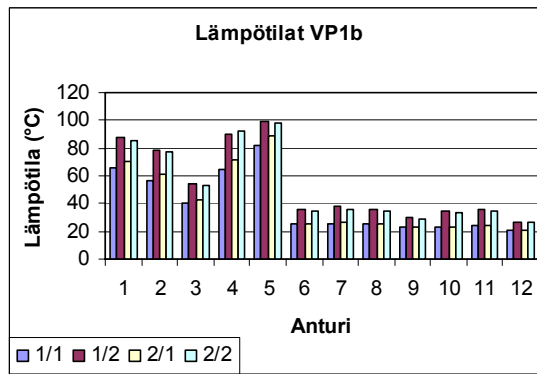
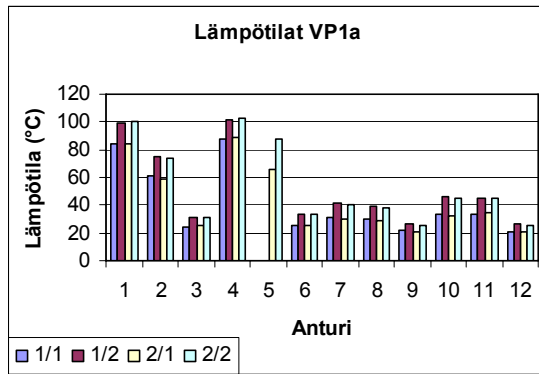
Ennen mikroaaltokuivauskokeita kuhunkin koekappaleeseen imeytettiin kapillaarisesti vettä noin kahden viikon ajan. Imeytys tehtiin neljässä vaiheessa, joista viimeisessä vaiheessa koekappale peittyi kokonaan veden alle. Imeytyksessä laattojen yläpinta (kuivaimen puoli) oli alaspäin. Mikroaaltokuivauksia tehtiin kaksi kierrosta. Kukin koekappale kuivattiin kummallakin kierroksella samalla tavalla. Koekappaleisiin VP1a, VP1b, VP2a ja VP2b kohdistettiin kaksi 30 minuutin kuivausjaksoa ja koekappaleeseen VS1a kaksi 60 minuutin kuivausjaksoa. Kuivausjaksojen välissä pidettiin 60 minuutin tauko.

## 2.2 Koetulokset

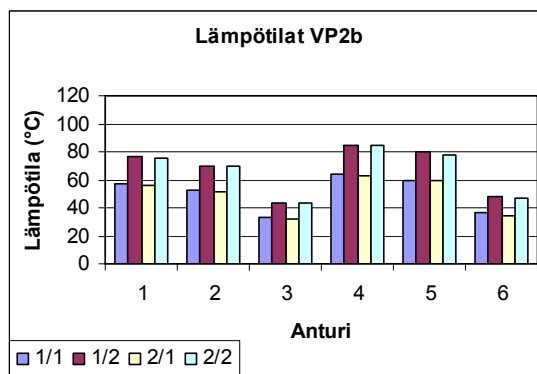
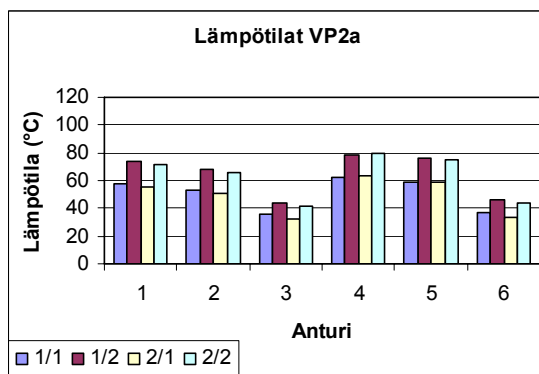
### 2.2.1 Lämpötilat

Kuvissa 5 - 9 on esitetty koekappaleiden lämpötilat antureittain 1. ja 2. kuivausjakson jälkeen 1. ja 2. kuivauskierroksella. Kaikkien antureiden osalta mittausajankohtana on käytetty ajanhetkeä, jolloin laatasta mitattiin maksimilämpötila. Lämmönjohtumisen sekä konvektiivisen lämmönsiirtymisen vuoksi lämpötila ei ole valitulla ajanhetkellä jokaisessa anturissa maksimissaan. Maksimilämpötila esiintyi kaikissa koekappaleissa aina anturissa 4 lukuun ottamatta koekappaleita VP1b, jossa maksimilämpötila mitattiin anturista 5.

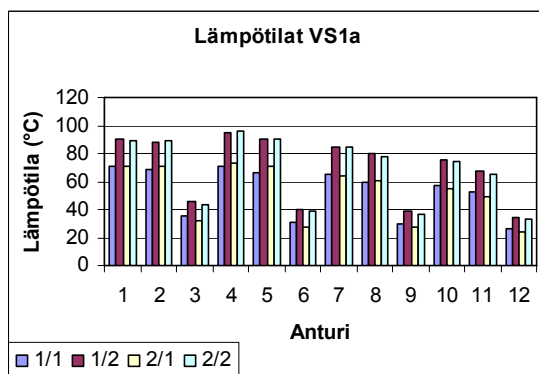




Kuva 5 ja Kuva 6. Vasemmalla koekappaleesta VP1a mitatut lämpötilat antureittain 1. ja 2. kuivausjakson jälkeen 1. ja 2. kuivauskierröksellä. Oikealla vastaavasti koekappaleesta VP1b mitatut lämpötilat.



Kuva 7 ja Kuva 8. Vasemmalla koekappaleesta VP2a mitatut lämpötilat antureittain 1. ja 2. kuivausjakson jälkeen 1. ja 2. kuivauskierröksellä. Oikealla vastaavasti koekappaleesta VP2b mitatut lämpötilat.



**Merkinnät**

- "1/1" 1. kuivauskierröksellä 1. kuivausjakson jälkeen
- "1/2" 1. kuivauskierröksellä 2. kuivausjakson jälkeen
- "2/1" 2. kuivauskierröksellä 1. kuivausjakson jälkeen
- "2/2" 2. kuivauskierröksellä 2. kuivausjakson jälkeen

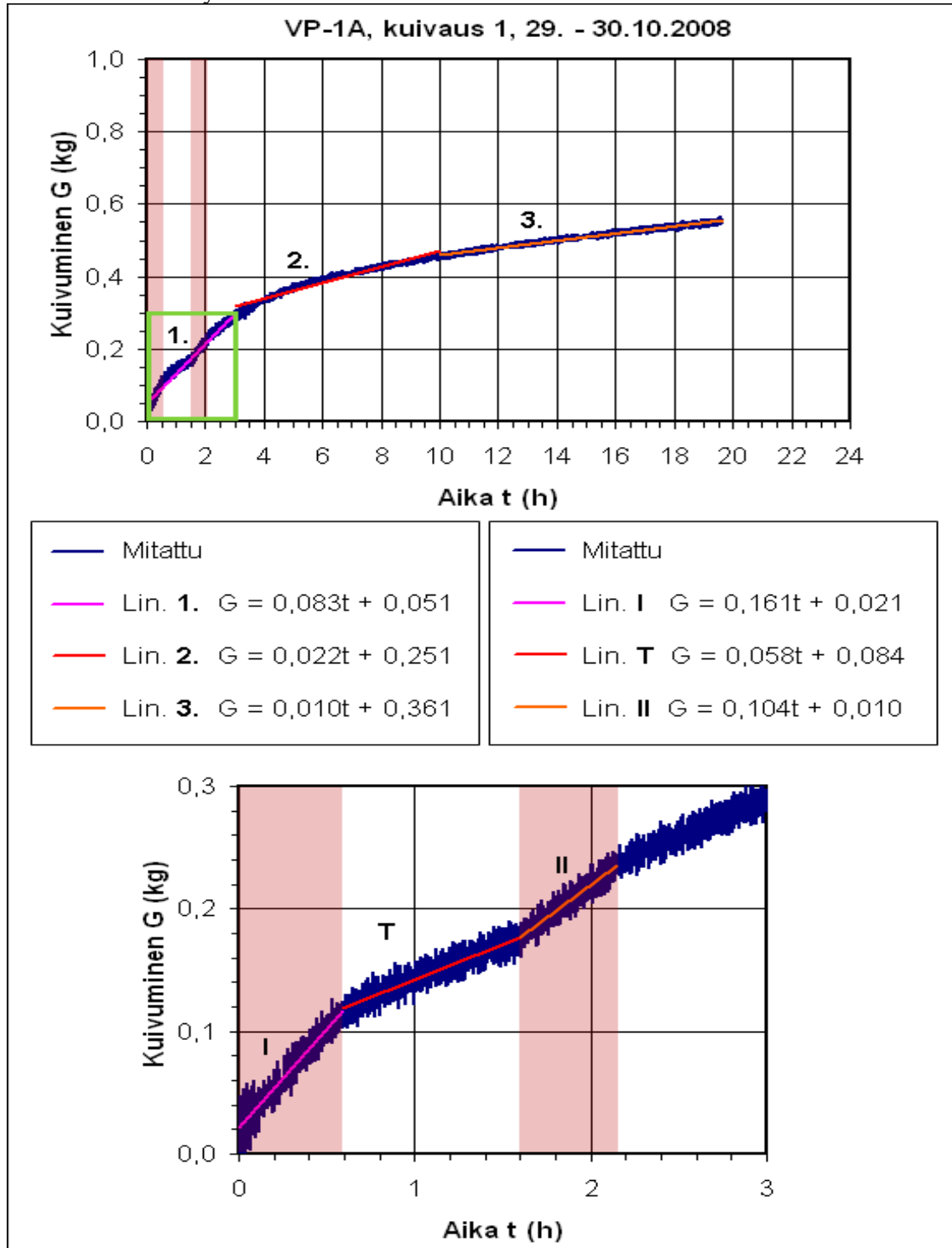
Kuva 9. Vasemmalla koekappaleesta VS1a mitatut lämpötilat antureittain 1. ja 2. kuivausjakson jälkeen 1. ja 2. kuivauskierröksellä. Oikealla kuvissa 5-9 käytettyjen merkintöjen selosteet.

**2.2.2 Kuivumisnopeus**

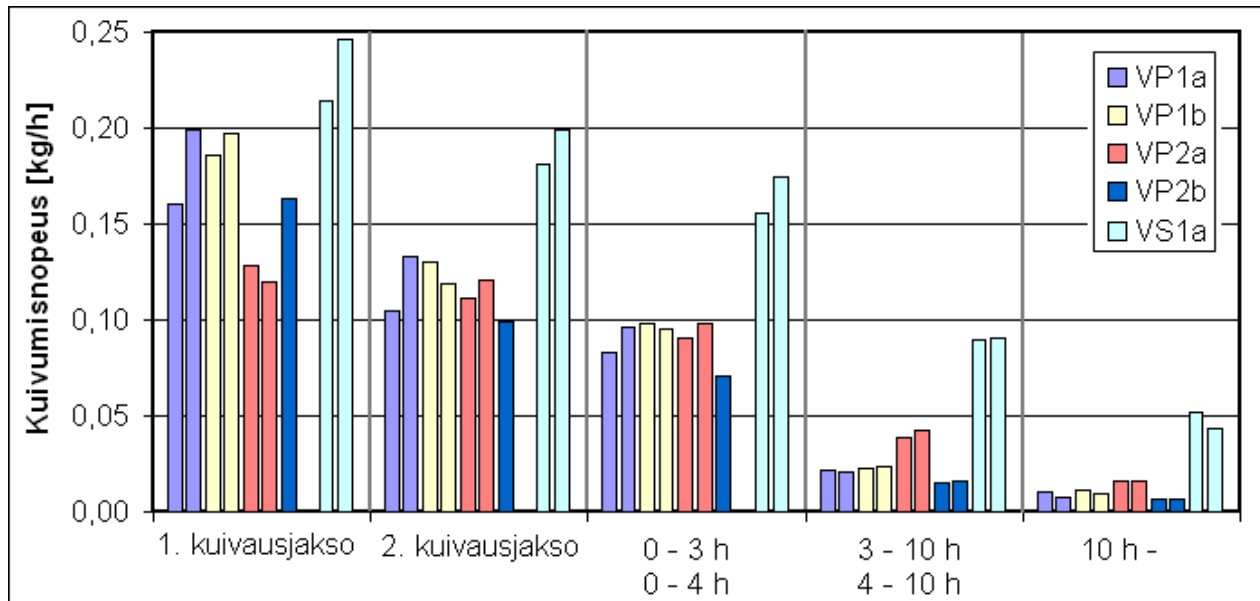
Koekappaleen VP1a painonmuutoskuvaaja ajan suhteen ensimmäisellä kuivauskierröksellä on esitetty kuvassa 10. Ensimmäinen ja toinen kuivausjakso on merkitty kuvaan vaalealla taustavärillä. Lisäksi kuvassa on esitetty kuivumiskäyrän linearisoinnit kokeen aloituksesta aikaväleillä

1. 0 - 3 tuntia,
2. 3 - 10 tuntia ja
3. 10 tuntia - kokeen lopetus.

Kuvan 10 alaosassa on tarkasteltu kuivumista kuivausjaksojen (I ja II) ja niiden välisen tauon (T) aikana sekä esitetty vastaavat linearisoinnit.



Kuvassa 11 on esitetty kunkin koekappaleen painonmuutoskuvaajien linearisointien kulmakertoimia vastaavat kuivumisnopeudet kuivumisjaksojen aikana sekä tarkasteluväleillä. Koekappaleen VS1a osalta aikaväleinä ovat 0 - 4 tuntia, 4 - 10 tuntia ja 10 tuntia - kokeen lopetus.



Kuva 11. Koekappaleiden kuivumisnopeudet eri tarkasteluväleillä 1. ja 2. kuivauskierroksen aikana. Kuvassa kunkin koekappaleen tarkasteluvälin oikean puoleinen arvo on mitattu 1. kuivauskierroksella ja vasen vastaavasti 2. kuivauskierroksella.

Taulukossa 2 on esitetty, paljonko laattaa imeytetystä vedestä poistui 19 tunnin aikana mikroaaltokuivauskokeen aloittamisesta ( $\Delta m_{19h}/m_{im}$ ), kun laattaa oli kohdistettu kaksi kestoltaan 30 tai 60 minuutin kuivausjaksoa. Vertailun vuoksi taulukossa on arvioitu laatan kuivumista 19 tunnin aikana suhteessa laattaa imeytettyyn vesimäärään ( $k_{10h} \cdot 19h/m_{im}$ ), jos laattaa ei olisi kohdistettu mikroaaltosäteilyä. Lisäksi taulukossa on arvioitu valitun mikroaaltokäsittelyn vaikutusta mikroaaltokuivaimen alaa kohti imeytettyyn vesimäärään ( $\Delta m_{mw}/m_{mw}$ ). Arvioissa on oletettu, että ilman mikroaaltosäteilyn vaikutusta laatan kuivumiskäyrä noudattaa tarkasteluvälin 10 h - kokeen lopetus kuivumista.

Taulukko 2. Laattaan imeytetyn veden poistuminen 19 tunnin aikana mikroaaltokuivauskokeen aloittamisesta ( $\Delta m_{19h}/m_{im}$ ), laatan kuivuminen ilman mikroaaltokäsittelyä 19 tunnin aikana suhteessa laattaan imeytettyyn vesimäärään ( $k_{10h} \cdot 19h/m_{im}$ ) ja mikroaaltokäsittelyn vaikutuksesta poistunut vesi suhteessa mikroaaltokuivaimen alaa kohti imeytettyyn vesimäärään ( $\Delta m_{mw}/m_{mw}$ ) koekappaleissa 1. ja 2. kuivauskierroksella.

Laatta	Kuivaus- kierros	Poistunut vesi imeytynyttä vesimäärää kohti	Kuivuminen imeytynyttä vesimäärää kohti ilman mikroaalto- käsittelyä	Mikroaalto- kuivuminen kuivaimen alalle imeytynyttä vesimäärää kohti
		$\Delta m_{19h}/m_{im}$	$k_{10h} \cdot 19h/m_{im}$	$\Delta m_{mw}/m_{mw}$
		%	%	%
VP1a	1.	11	4	18
	2.	10	3	19
VP1b	1.	10	3	17
	2.	9	3	18
VS1a	1.	16	9	24
	2.	16	7	29
VP2a	1.	15	7	33
	2.	16	6	37
VP2b	1.	9	3	23
	2.	10	3	27

## 2.3 Tulosten analysointi

### 2.3.1 Lämpötilan mittaus

Kuivaimen keskialueelta (1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 ja 11) mitatut lämpötilat olivat reunalta (3, 6, 9 ja 12) mitattuja lämpötiloja korkeampia kaikissa koekappaleissa, mikä oli oletettavaa, koska betonin lämmönjohtumiskerroin on melko alhainen.

Koekappaleissa VP1a ja VP1b 110 mm syvyydellä olevien antureiden lämpötilat jäivät keskialueella paljon alhaisemmiksi kuin vastaavissa 40 mm syvyydellä olevissa antureissa. Koekappaleessa VS1a maksimilämpötilat 50 mm syvyydellä olivat lähes yhtä suuria kuin koekappaleissa VP1a ja VP1b, vaikka sen mikroaaltokuivausaika oli kaksinkertainen. Kuitenkin koekappaleen VS1a 100 mm syvyydellä mitatut lämpötilat olivat paljon korkeampia kuin koekappaleissa VP1a ja VP1b.

Huokoisuuden kasvu alentaa Lin et al. [2] tutkimuksen mukaan kappaleen lämpötiloja sekä syntyviä höyrynpaineita mikroaaltokäsittelyn aikana. Koekappale VS1a kuivui muita koekappaleita nopeammin. Suurempi kuivumisnopeus viittaa koekappaleen VS1a läpäisevyysominaisuuksien poikkeavan muista. Mahdollisesti koekappale VS1a oli hyvin huokoinen. Korkea huokoisuus selittää todennäköisesti osaltaan sen, miksi lämpötilat eivät nousseet korkeammiksi, vaikka kuivausaika oli kaksinkertainen. Kuivausajan kaksinkertaistaminen vuoksi koekappale VS1a lämpeni todennäköisesti kokonaisuudessaan enemmän, myös sisäosistaan. Toisaalta nopea höyrynpoistuminen ja kuivaimen konvektiovirtaus laskivat pintaosan lämpötiloja. Todennäköisesti näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta lämpötilajakauma rakenteen syvyyssuunnassa muodostui tasaisemmaksi.

Koekappaleiden VP2a ja VP2b tulosten perusteella heijastuksen mahdollistava pelti ei vaikuttanut kasvattavan koekappaleeseen VP2b muodostuvia lämpötiloja mitatuissa pisteissä. Koska mikroaaltosäteily vaimenee sitä nopeammin, mitä enemmän koekappaleessa on vettä, saattoi koekappaleen VP2b kosteustilan vaikutus lämpötiloihin olla suurempi kuin pellin. Epäselväksi jäi, miten pelti olisi vaikuttanut lämpötiloihin, jos kuivausta olisi jatkettu tai raudoitusta ei olisi ollut.

### 2.3.2 Kuivumisnopeuden mittaaminen

Kuivumisnopeudet kasvoivat kuivausjaksojen aikana selkeästi. Toisella kuivausjaksolla kuivuminen hidastui hieman ensimmäiseen kuivausjaksoon verrattuna. Kuivausjaksojen aikana kuivumisnopeudet olivat kahteen suuntaan kuivuvissa koekappaleissa välillä 0,10 - 0,25 kg/h ja haihduttavaa pinta-alaa kohti vastaavasti 0,09 - 0,24 kg/(m<sup>2</sup>h). Yhteen suuntaan kuivuvassa koekappaleessa VP2b vastaavat kuivumisnopeudet olivat välillä 0,10 - 0,16 kg/h ja 0,17 - 0,29 kg/(m<sup>2</sup>h). Lämpötilojen tasaannuttua noin huonelämpötilaan putosi kuivumisnopeus kahteen suuntaan kuivuvissa koekappaleissa välille 0,01 - 0,05 kg/h ja haihduttavaa pinta-alaa kohti vastaavasti välille 0,01 - 0,04 kg/(m<sup>2</sup>h). Yhteen suuntaan kuivuvassa koekappaleessa VP2b vastaavat kuivumisnopeudet olivat lämpötilojen tasaannuttua 0,01 kg/h ja 0,01 kg/(m<sup>2</sup>h). Koekappaleen VS1a kuivuminen erosi muista koekappaleista. Koekappale VS1a kuivui muita koekappaleita sekä kokonaismäärällisesti selkeästi enemmän että nopeammin silloin, kun kuivain ei ollut päällä. Tämä viittaa siihen, että VS1a oli hyvin huokoista ja poikkesi huokosominaisuuksiltaan muista koekappaleista.

Koejärjestelyissä kuivain pidettiin normaalista työmaakäytöstä poiketen paikoillaan, minkä vuoksi koekappaleen pinta-ala vaikuttaa voimakkaasti kokeessa poistuneen ja kappaleeseen imeytetyn vesimäärän suhteeseen. Kun tarkastellaan, paljonko laatat kuivuivat mikroaaltokäsittelyn vaikutuksesta kuivausalalle imeytettyä vesimäärää kohti, oli kuivunut vesimäärä 2,6 - 9,0 -kertainen verrattuna vesimäärään, joka olisi poistunut kokeen aikana koko laattaan imeytetystä vesimäärästä ilman mikroaaltokuivausta.

Mikroaaltokuivaus kasvattaa höyrynpainetta kappaleen sisällä. Tulosten perusteella on vaikea arvioida, kuinka paljon paineen kasvu selittää kosteuden poistumisesta mikroaaltokuivauksen aikana. Schiffmannin [4] mukaan paineen vaikutus kuivumiseen on sitä suurempi, mitä korkeampi kappaleen lähtökosteuspitoisuus on. Tämä saattaa selittää sitä, miksi toisella kuivausjaksolla kuivuminen oli pääosin hitaampaa ensimmäiseen kuivausjaksoon verrattuna. Koetulosten perusteella mikroaaltokuivaus nopeuttaa selvästi kosteuden poistumista betonista. Koetulosten pohjalta on kuitenkin vaikea arvioida kappaleen huokoisuuden ja paksuuden vaikutusta kuivumisnopeuteen, koska koemäärät olivat pieniä ja koekappaleet materiaaliominaisuuksiltaan erilaisia.

## 3. Yhteenveto

Tutkimus kohdistui vanhan kapillaarisesti kostuneen betonirakenteen mikroaaltokuivauksen tutkimiseen. Kuivumisen ja siihen vaikuttavien tekijöiden merkityksen arviointi oli laboratoriokokeiden perusteella vaikeaa, sillä koekappaleet eivät olleet keskenään vertailtavissa ja koemäärät olivat pieniä. Vertailua vaikeuttavat muun muassa erot koekappaleiden materiaalissa, dimensioissa ja raudoituksessa. Myös betonissa olevat suolat vaikuttavat betonin sähkönjohtavuuteen ja edelleen mikroaaltosäteilyn absorboitumiseen. Osaltaan koekappaleaineiston hajanaisuus johtui siitä, että laboratoriotutkimuksessa käytettiin rakennekoekappaleita.

Mikroaaltokuivauksen aikana koekappaleisiin syntyvien syvyysuuntaisten lämpötilajakaumien havaittiin poikkeavan toisistaan. Koekappaleessa VS1a, johon kohdistettiin kaksinkertainen mikroaaltokäsittely, syvyysuuntainen lämpötilajakauma oli tasaisempi kuin lyhytkestoisemman käsittelyn saaneissa laatoissa. Mikroaaltosäteily vaimenee materiaalissa sitä nopeammin, mitä kosteampi materiaali on. Toisaalta kappaleeseen syötetyn lämpöenergian kasvaessa myös kappaleen sisäosat lämpenevät enemmän.

Kuivumisnopeudet kasvoivat selvästi kaikissa koekappaleissa mikroaaltokäsittelyn aikana. Kahteen suuntaan kuivuvissa koekappaleissa kuivumisnopeudet olivat kuivausjaksojen aikana 210 mm paksuissa koekappaleissa VP1a ja VP1b 11 - 25 -kertaisia verrattuna kuivumisnopeuteen, kun lämpötilat koekappaleissa olivat tasaantuneet takaisin huonelämpötilan tasolle. Vastaavasti 80 mm paksussa koekappaleessa VP2a kuivumisnopeudet olivat 7 - 8 - kertaisia ja 160 mm paksussa koekappaleessa VS1a 3 - 6 -kertaisia. Yhteen suuntaan kuivuvassa 80 mm paksussa koekappaleessa VP2b kuivumisnopeudet olivat 14 - 23 -kertaisia. Toisella kuivausjaksolla kuivuminen oli pääosin hieman hitaampaa ensimmäiseen kuivausjaksoon verrattuna, mikä saattaa osin selittyä koekappaleiden pintaosan kosteuspitoisuuden alenemiselle. Koetuloksista oli havaittavissa, että ainakin rakenneratkaisu vaikutti kuivumisnopeuteen. Yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen kuivuminen hidastui nopeammin mikroaaltokäsittelyn päätyttyä kuin kahteen suuntaan kuivuvan rakenteen. Laatoista mitatut kuivumisnopeudet eivät ole yleisesti päteviä. Toteutetut kokeet antoivat kuitenkin suuruusluokkatietoa betonin kuivumisnopeudesta mikroaaltokuivauksen aikana verrattuna vapaasti pinnaltaan kuivuvaan betoniin, kun betoni on kuivauksen alussa kapillaarisesti vedellä kyllästynyt.

Koekappaleen VP2b alapintaan kiinnitetyn pellin ei havaittu kasvattavan koekappaleesta mitattuja lämpötiloja. Kuivauskäsittelyn päätyttyä koekappaleessa VP2b oli kuitenkin jäljellä kapillaarista kosteutta. Mikäli kuivausta olisi jatkettu, on mahdollista, että pellistä heijastuva mikroaaltosäteilyn merkitys kasvaisi ja nostaisi lämpötiloja koekappaleen sisällä. Koekappaleiden raudoitukset poikkeivat sekä geometrialtaan ja raudoittemääriltään toisistaan. Raudoituserojen vaikutusta mitattuihin lämpötiloihin tai kuivumisnopeuksiin ei tutkimuksen puitteissa pystytty kuitenkaan havaitsemaan.

## Lähdeluettelo

- [1] Constant, T. & Moyne, C. & Perré, P. Drying with internal heat generation: Theoretical aspects and application to microwave heating. *AIChE Journal*, 1996. Vol. 42:2. S. 359-368. ISSN 0001-1541.
- [2] Li, W. & Ebdian, M. A. & White, T. L. & Foster, D. Heat Transfer Within a Steel-Reinforced Porous Concrete Slab Subjected to Microwave Heating. *Journal of Heat Transfer*, 1995. Vol. 117. S. 582-589. ISSN 0022-1481.
- [3] Saltiel, G. & Datta, A. K. Heat and Mass Transfer in Microwave Processing. Teoksessa: Hartnett, J. P. & Irvine, T. F. & Cho, Y. & Greene, G. (toim.) *Advances in Heat Transfer*. Vol. 33. Boston: Academic Press, 1995. S. 1-94. ISBN 0-12-020033-3.
- [4] Schiffmann, R. F. Microwave and Dielectric Drying. Teoksessa: Mujumdar, A. S. (toim.) *Handbook of Industrial Drying*. 3. painos. New York and Basel: CRC Press, 2006. S. 285-306. ISBN 1574446681.

## **Kartanon viljamakasiini - korjataanko vai rakennetaanko uudestaan?**

Anu Laurila  
Museovirasto

### **Tiivistelmä**

Vanhasta 1800-luvun alun täystiilirakenteisesta viljamakasiinista oli tarkoitus tehdä näyttely- ja konserttitila. Makasiini on suojeltu julkisivujen osalta asemakaavassa. Viljamakasiinissa oli säilynyt paljon mahdollisesti alkuperäisiä rakenteita.

Museoviraston esittämä suojelutavoite oli pyrkiä säilyttämään edelleen mahdollisimman paljon rakenteita tai ainakin aidosti tutkia, onko rakenteita mahdollista säilyttää. Suunnittelijat luonnollisesti halusivat varmistaa, että kaikki rakenteet ja talotekniikkaa toimivat tulevaisuudessa mahdollisimman hyvin. Niinpä rakennesuunnittelija halusi tehdä alapohjan kokonaan uusiksi, jotta varmistetaan, ettei sisäilmaongelmia ilmene. Rakennusvalvonnan taholta vaadittiin koneellista ilmanvaihtoa, jolla varaudutaan suurimpiin mahdollisiin henkilömääriin rakennuksessa.

Julkisivurappaus haluttiin uusia kokonaan, jotta varmistetaan sen kestävyys tulevaisuudessa. Lopputulema oli, että vanha alapohjarakenne säilyi uuden alla, ilmanvaihto toteutettiin tehostettuna painovoimaisena ja julkisivut rapattiin lähes kokonaan uusiksi. Vanhaa rappausta jäi räystäälle ja ovipieliin.

Suojelutavoitteet ohjasivat suunnittelua rakenteita säästävään suuntaan ja pakottivat tarkastelemaan rakennusta kokonaisuutena.

### **1. Kohteen kuvaus**

Viljamakasiini on vuodelta 1828 ja sen suunnittelijaksi perimätieto mainitsee Engelin. Koska kartanon päärakennus on siirretty nykyiselle paikalleen viljamakasiinin läheisyyteen 1830-luvulla, viljamakasiini saattaa olla vanhin alkuperäisellä paikallaan oleva rakennus pihapiirissä. Nyt makasiini sijaitsee aivan tien vierellä. Tietä on levennetty ja korotettu siitä, mitä se on ollut makasiinin rakennusaikaan. [1] Tien pinnan nosto oli ohjannut vedet makasiinia kohti. Tämä puolestaan oli aiheuttanut makasiinin perustusten liikkumista ja seinämuurien halkeilua.

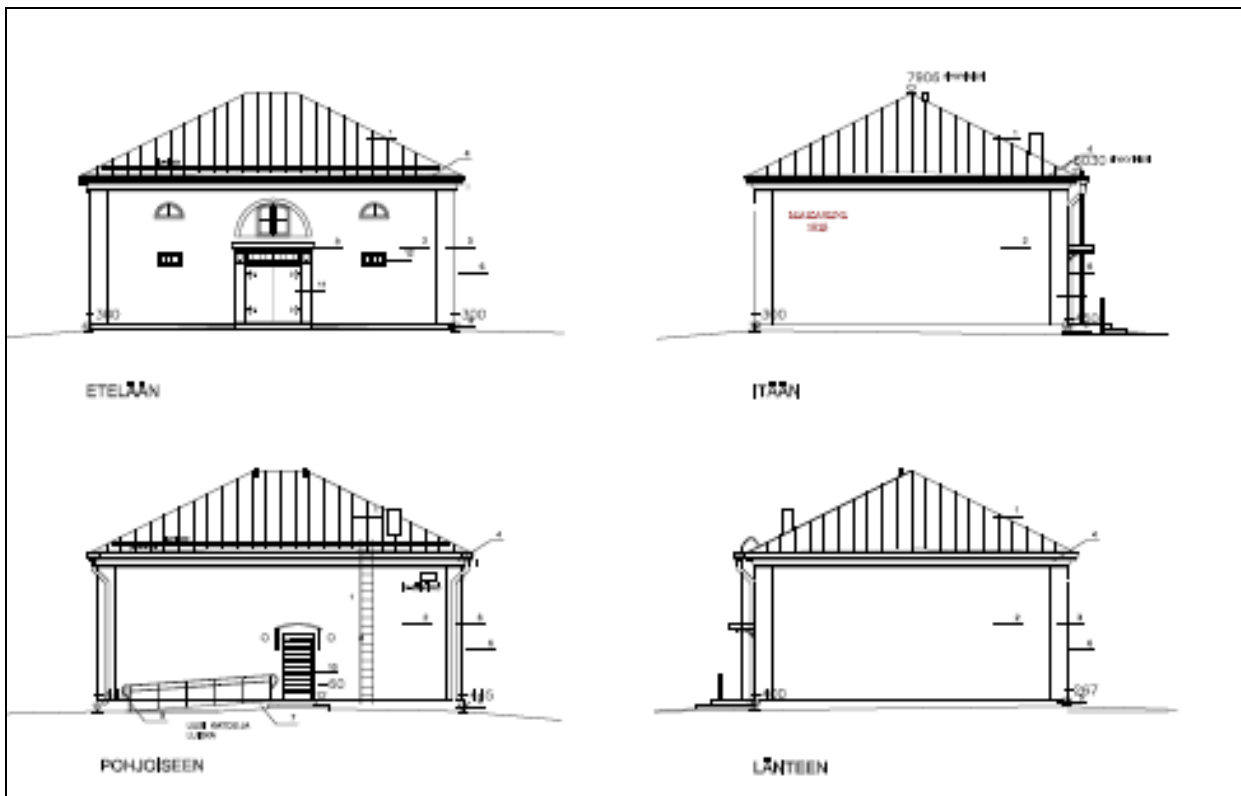
Viljamakasiinissa oli säilynyt paljon mahdollisesti alkuperäisiä rakenteita. Tiilestä muuratut massiivirakenteiset ulkoseinät oli kalkkirapattu niin sisältä kuin ulkoa. Halkeamista näkyi julkisivun vanhoja maalikerroksia; keltaisia ja vaaleanpunaisia kalkkimaaleja. Viimeisimmäksi rakennus oli maalattu vaaleanpunaiseksi ja maalityyppi oli muu kuin kalkkimaali.

Sisällä välipohjaa ja kattoa kannattavat, veistetyt puurakenteet olivat säilyneet. Samoin välipohjan laudoitus oli tehty paksuista käsin sahatuista, pontatuista laudoista, jotka oli kiinnitetty palkkeihin takonauloilla. Vain muutamia luukunpaikkoja oli naulattu myöhemmin umpeen.

Alapohjasta oli puurakenteet jo purettu, kun kävin ensi kerran paikalla. Näkyvillä oli keskikäytävän betonilattia ja sivuosien kaksinkertainen, tiilistä muurattu alapohja, jossa oli kolot laualattian kannattajapalkeille. Yksi puupalkki ja noin 20 cm osuus lattialautoja oli säilynyt yhdessä nurkassa, muut oli purettu. Tiilien muurauksessa käytetty laasti vaikutti savipitoiselta ja sitä oli kerros myös tiilien alla. Seinän vierelle oli tehty koekuoppa, josta rakennetta saattoi tutkia. Laastin alla oli suurehkoja kiviä, joiden seassa oli ruumenia. Ulkopuolelta vaikutti siltä, että tähän kivitilaan johti tuuletusluukkuja kivijalasta. Perustus oli tehty kivistä latomalla. Esillä oleva tiilirakenne vaikutti kuivalta, mutta asiaa ei mitattu.

Vesikattona oli uudehko saumapeltikate, mutta sen alusrakenne oli lähes umpeen laudoitettu osin vanhoilla lautakattolaudoilla, osin käsin sahatuilla laudoilla.

Tien puoleinen ovi oli vanha metalliovi ja samalla seinällä olivat rakennuksen ainoat ikkunat. Nämä saattavat olla alkuperäiset, kuluneet, mutta sirot ja huolellisesti tehdyt. Pihan puolen ovi oli uudempi teräsovi.



Kuva 1. Makasiinin julkisivut (korjaussuunnitelma). Arkkitehtitoimisto Satu Päivärinne OY.

## 2. Makasiinin korjaushankkeen kulku

Viljamakasiinista haluttiin tehdä pienimuotoinen näyttely- ja konserttitila. Makasiini on suojeltu julkisivujen osalta asemakaavassa.

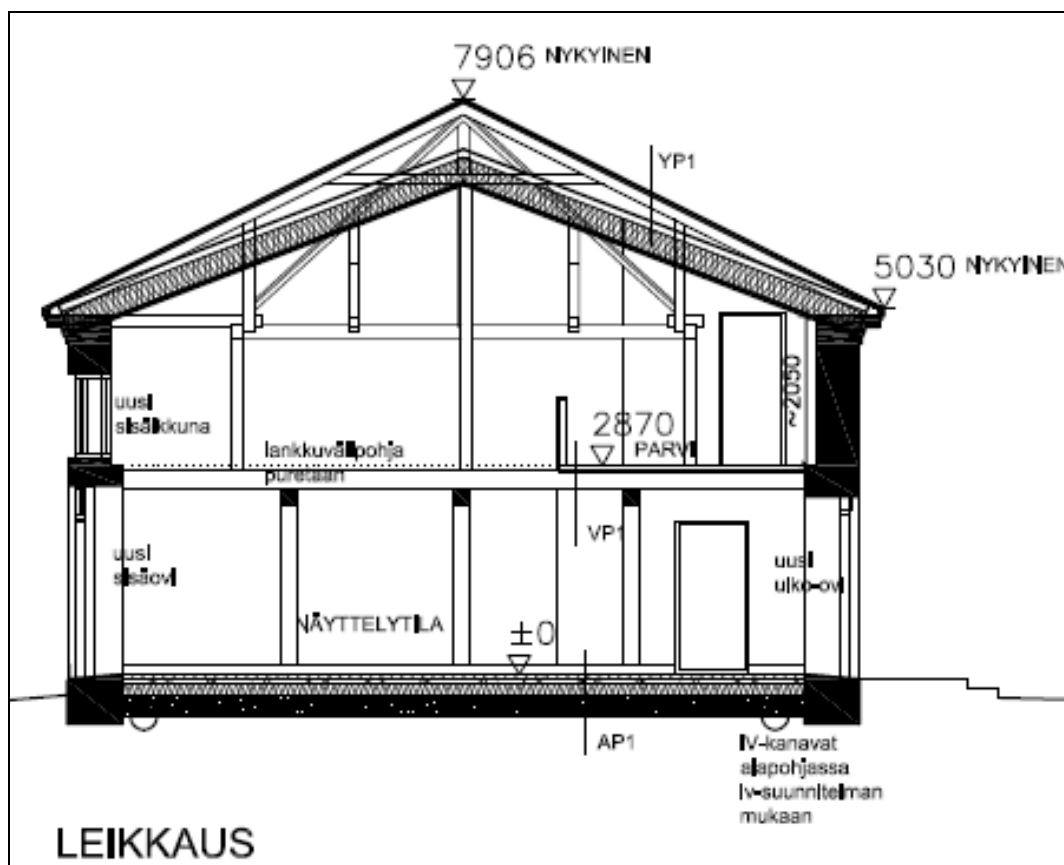
Hanke sai ympäristökeskuksen kautta EU-rahoitusta, joka aiheutti hankkeelle hyvin kireän aikataulun.



## 2.1 Museoviraston ohjaus

Viljamakasiinin korjaustyötä varten annettiin seuraavat tavoitteet Museoviraston taholta. Näillä oli tarkoitus ohjata suunnittelua rakenteita säästävään ja ymmärtävään (tutkivaan) suunnitteluun. Ongelmana oli, että virallinen suojelu koski vain ulkoasua, sisätilojen osalta suojelumääräyksiä ei ollut. Joten sisätilojen osalta Museovirasto saattoi vain antaa suosituksia:

- mahdollisimman paljon säilyneitä rakenteita tulee säilyttää edelleen
- yläpohjan lämmöneristystä suunniteltaessa on tuuletusvälin oltava tarpeeksi suuri, jotta vanha aluskate säilyisi ja tuulettuisi erityisen hyvin / aluslaudoituksen harventamista voidaan mahdollisesti harkita
- alapohjan rakennetta pohdittaessa lähtökohtana tulee pitää tiilirakenteen säilyttämistä ja säilymisen turvaamista
- alapohjan rakenne on selvitettävä kunnolla, jotta sen toiminta voidaan jatkossakin varmistaa
- samoin perustustapa on selvitettävä, erityisesti se, onko rakennuksella hirsiarinaa (salaojituksen tarve pohdittava samalla; riittäisikö, jos tieltä ohjautuvat vedet saataisiin hallintaan ja maan pinta kaatamaan rakennuksesta pois?)
- välipohjan laudoituksesta on pyrittävä säilyttämään edes puolet
- julkisivujen ja sisäpuolen rappauksesta tulee selvittää niiden koostumukset ja korjaukset on tehtävä samanlaisella tai heikommalla laastilla
- julkisivujen värityksen vaiheet on tutkittava ja dokumentoitava
- rakennuksen ilmanvaihdon koneellisuuden tarpeellisuus on harkittava (ilmatilaa on kuutioina paljon suhteessa lattiapinta-alaan, riittäisikö painovoimainen?)



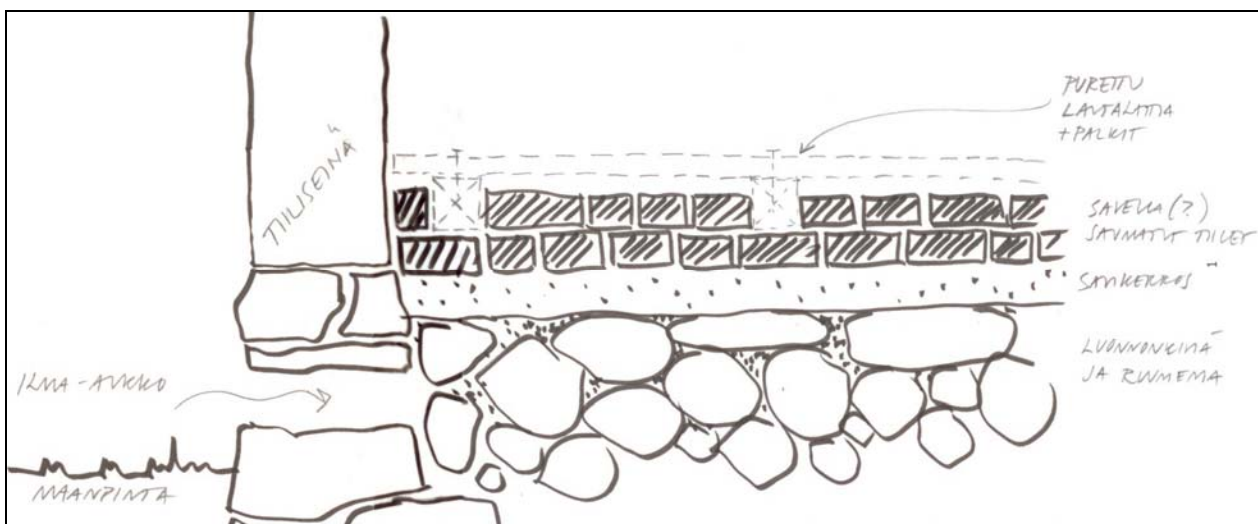
Kuva 2. Makasiinin leikkaus (korjaussuunnitelma). Arkkitehtitoimisto Satu Päivärinne OY.

### 3.1 Alapohjan rakenne

Tavoite oli siis säilyttää vanha rakenne. Rakennesuunnittelija kuitenkin esitti vanhan rakenteen purkamista maata myöten ja uuden alapohjan tekemistä maanvaraisena betonilaattana. Syynä olivat tiililadelman alla olevassa kivikerroksessa olevat ruumenet, jotka paikoin olivat kosteita ja haisivat ja saattaisivat tulevaisuudessa tuottaa sisäilmaongelmia. Toisaalta veden ohjautuminen rakennuksen alle pyrittiin nyt estämään salaojituksella ja bentoniittimatolla, jolloin kosteuden kertyminen estyy.

Lopputuloksena oli, että arkkitehdin, rakennesuunnittelijan ja Museoviraston yhteistyössä kehiteltiin ratkaisu, jossa uusi lattia tehdään vanhan rakenteen päälle, mutta tiivistetään hyvin reunoilta mahdollisten mikrobien kulkeutumisen estämiseksi alapohjasta sisäilmaan. Eli vanha kivien päälle tehty tiililadelmä säilyi. Sen päälle tuli kerros salaojatoraa. Tämän päällä oli eristävä levy, jonka päälle asennettiin polyuretaanieristeet. Näiden päälle valettiin uusi betonilaatta, johon asennettiin lattialämmitys. Lisäksi salaojatorakerroksen sisään asennettiin radonputkisto, joka johdettiin katolle ja jonka on tarkoitus kerätä kerrokseen mahdollisesti kertyvä kosteus. Kosteuden kerääntymistä lattian alle ei kuitenkaan pidetty suurena riskinä, koska tiilirakenne nyt oli kuiva ja koska tieltä ohjautuvien vesien poisjohtaminen rakennuksen viereltä ja salaojitus oli jo päätetty tehdä.

Alapohjan osalta vaatimus säilyttämisestä tarkoitti sitä, että tulee tutkia vanhan rakenteen toiminta ja kehittää sellainen rakenne, että vanha säilyy (vaikka uuden alla). Säilyttäminen oli siis suunnittelun pohjaksi asetettu tavoite, mutta jos olisi pystytty osoittamaan, että säilyttäminen varmasti aiheuttaa ongelmia esimerkiksi rakennuksen käyttäjien terveykselle, olisimme hyväksyneet vanhan rakenteen purkamisen. Tällöin vanha rakenne olisi pitänyt dokumentoida hyvin valokuvaten ja piirtäen purkamisen yhteydessä. Tässä on tosin muistutettava, että sisätilojen osalta Museovirasto saattoi vain antaa suosituksia, koska suojelumääräykset koskivat julkisivuja.



Kuva 3. Käsivarapiirros vanhasta alapohjarakenteesta. Anu Laurila.

#### 4.1 Ilmanvaihtokysymykset

IV suunnittelija selvitti ilmanvaihdon vaatimuksia tulevalle käytölle rakennusvalvontaviranomaisilta. Nämä vaativat täysin koneellista ilmanvaihtoa mikäli rakennuksessa pidetään suurehkoja yleisötilaisuuksia. Museovirasto esitti painovoimaisen ilmanvaihdon säilyttämistä. Tässä yhteydessä keskusteltiin siitä, onko tilan kosteutta sitovilla materiaaleilla (kalkkimaalattu kalkkirappaus, käsittelemätön puu) merkitystä ilmanlaatuun tilanteissa, joissa paikalla on suuri joukko ihmisiä ja ilman kosteus nousee. Tai onko sillä merkitystä, että tila on pieni, mutta korkea eli ilmakeuutioita on paljon. Rakentamista ohjaavien määräysten mukaan taas erityisesti hiilidioksidipitoisuutta mitataan [2]. Mainittakoon, että tila on aiemmin toiminut olutravintolana, jossa ei saatujen tietojen mukaan ole ollut koneellista ilmanvaihtoa.

Keskustelun jälkeen päädyttiin ratkaisuun, jossa ilmanvaihto toteutettiin ”kevyenä” koneellisena. IV-konehuone ja kanavat sijoitettiin sisätilaan, parvelle, joten rakennuksen ulkoasuun sillä ei ollut suurta vaikutusta.

Suojelutavoitteiden osalta toive alapohjarakenteen säilyttämisestä liittyi ilmanvaihtoon. Jos alapohjan epäillään tuottavan epäpuhtauksia sisäilmaan, voi ilmanvaihto toteuttaa nämä epäilyt. Eli jos tilaan saadaan aikaan alipaine, alkaa korvausilmaa virrata vääristä raoista, jopa alapohjan kautta. Nyt ilmanvaihto tehtiin sen verran kevyenä, että tätä ei pitäisi tapahtua ja toisaalta alapohjan uusi betonilaatta tiivistettiin hyvin reunoiltaan, jottei ilmavuotoja tapahtuisi.

#### 5.1 Julkisivut

Työn kuluessa kävi ilmi, että julkisivut on muurattu huonosti poltetuista tiilistä savipitoisella kalkkilaastilla. Olisi mielenkiintoista tietää, onko se harkittua vai onko kyseessä huonosti tehty rakennus. Huonosti palaneella tiilellä ja savipitoisella kalkkilaastilla on yksi yhtenevä piirre: ne sitovat kosteutta hyvin. Onko tätä tai jotain muuta ominaisuutta tavoiteltu ja miksi? Ainakin rakenne aiheutti ongelmia korjaajille. Muun muassa muurauslaastin koostumusta etsittäessä päädyttiin heikentämään korjauksessa käytettävää kalkkilaastia savella, jotteivät korjaukohdat käyttäytyisi jatkossa eri tavoin kuin muu rakenne.

Rappauslaasti oli ainoa, joka korjaussuunnittelun aikana ehdittiin kunnolla selvittää. Vanhasta laastista teetettiin VTT:llä analyysi [3]. Siinä selvisi, että laasti oli laihaa kalkkilaastia, jossa osa kalkkikivestä oli jäänyt poltossa palamatta ja toimi nyt laastissa runkoaineen tavoin. Varsinainen runkoaine puolestaan oli hienoa hiekkaa, rakeisuus 0-1,0mm. Sideaineena toimiva kalkki puolestaan oli heikosti hydraulista johtuen siinä olevista epäpuhtauksista. Tämä on vanhoissa laasteissa tyypillistä.

Yllättävää vanhassa rappauksessa oli, että se yleisilmeeltään oli siistin näköinen vaikka tutkittaessa sen kuntoa se osoittautui kopoksi lähes kauttaaltaan. Siksi päädyttiin sen poistamiseen ja uuden rappauksen tekemiseen, koska olisi ollut kohtuuttoman hankalaa säästää pieniä rappausalueita siellä täällä.

Uusi laasti pyrittiin tekemään samankaltaisena kuin vanha, vain runkoainejakaumaa muutettiin siten, että se oli 0-1,5mm. Näin pyrittiin estämään kuivumishalkeilua, joka vanhassa laastissa oli ollut rajua.

#### 4. Suojelun tarkoitus ja tavoitteet

Suojelun tarkoitus rakennusten kohdalla on saada rakennukset säilymään ja säilyttämään arvonsa omistajasta ja käytöstä riippumatta. Suojelu ei tarkoita automaattisesti kaiken säilyttämistä, ”museoimista”, kuten usein kuulee sanottavan. Joskus päädytään purkamaan rakenteita tai jopa rakennuksia, joilla olisi suojeluarvoa. Tällöin kuitenkin rakenteet ja rakennus tulee dokumentoida, jotta tieto säilyy ja lisää ymmärrystämme vanhoista rakenteista.

Kaikki vanhat rakennukset ovat yksilöitä, joita on käsiteltävä niiden omista lähtökohdista käsin. Vanhojen ja erityisesti suojeltujen rakennusten korjaussuunnittelu vaatii oivaltavaa ja innovatiivista ajattelua. Lähtökohtana ei voi olla, että varmuuden vuoksi uusitaan kaikki sellaiset rakenteet, jotka eivät ole totuttuja tai tuttuja. Erityisen tärkeää on tarkastella rakennusta kokonaisuutena niin arkkitehtonisesti kuin rakennusfysikaalisesti ja suhteuttaa korjaustoimet sen tulevaa käyttöön. Suunnittelu vaatii aikaa ja tutustumista rakennukseen sekä sen rakenteiden toiminnan selvittämistä. Vanhojen rakenteiden tutkimus korjaustyön yhteydessä puolestaan tuo lisää tietoa käytetyistä materiaaleista ja rakenteista.

#### 5. Yhteenveto

Nyt käsiteltävänä oleva viljamakasiini oli mielenkiintoinen säilyneisyytensä vuoksi. Alapohjan rakenne oli erityisen kiinnostava ja sen kaltaisesta rakenteesta yritettiin löytää tietoa vanhoista rakennusoppaista. Tuloksetta. Siksi olisi ollut suotavaa selvittää rakenne perusteellisesti ja pohtia sen toimintaperiaate kunnolla ennen lopullisen korjaustavan valintaa. Hankkeen aikataulu vaan ei antanut siihen mahdollisuuksia.

Niinpä tästä hankkeesta jäi jäljelle paitsi onnistuneesti korjattu rakennus, myös muutama selvitettävä kysymys:

- mikä on alapohjarakenteen toimintaperiaate ja onko samanlaisia rakenteita ollut muuallakin
- onko seinät tarkoituksella muurattu huonosti poltetuista tiilistä savipitoisella laastilla ja jos on, niin miksi

Suojelua ei pidä ajatella esteenä rakennuksen käytölle ja korjaamiselle vaan mahdollisuutena tutkia, pohtia, oppia ja oivaltaa uutta. Suojelustatuksen pitäisi pysäyttää suunnittelijat pohtimaan aidosti, miten tässä kohteessa saataisiin rakennus korjattua sen omista lähtökohdista käsin eikä tarjota heti tuttuja nykyaikaisia rakenteita ainoana ratkaisuna.

#### Lähdeluettelo

- [1] Vanha valokuva Museoviraston kuva-arkistosta Neg. 11478.
- [2] RakMK D2 ja Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohje 01.05.2003
- [3] VTT tutkimusselostus Nro VTT-S-03670-09

# Kokemuksia kuntotutkimuksiin liittyvien mittaustulosten tulkinnasta: yleiset virheet ja sudenkuopat

Jommi Suonketo  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Tässä kirjoituksessa käsitellään kuntotutkimusten tulosten tulkinnassa melko yleisesti tehtäviä virheitä ja niiden merkitystä, sekä keinoja virheiden välttämiseen. Valtaosa käytännön kuntotutkimuksissa tehtävistä mittauksista liittyy kosteuden ja lämpötilan mittaamiseen, joten niillä on suuri osuus myös virhetulkinnoissa.

## 1. Johdanto

Rakennusten kunnan arvioiminen pohjautuu pitkälti aistivaraiseen havainnointiin sekä kokemuksen tuomaan tietoon. Siirryttäessä kuntoarvioista enemmän kuntotutkimusten suuntaan, erilaisten rakennusfysikaalisten mittausten määrä luonnollisesti myös kasvaa.

Allekirjoittaneen kokemukset kuntotutkimuksista ja otsikon mukaisista tulkinnoista ovat muodostuneet 15 vuoden aikana kuntotutkimusten tekemisestä ja sen opettamisesta. Oppia on myös kertynyt satojen riitatapauksia käsittelevien asiantuntijalausuntojen laatimisesta ja näihin ongelmakohteisiin liittyneiden aiempien tutkimusten uudelleen analysoimisesta. Olen myös oppinut omista virheistäni kantapään kautta.

Valitettavan usein on ollut havaittavissa, että erilaisia mittauksia tehdään ilman riittävää tietämystä niiden suorittamisesta tai ainakaan niiden tulosten kunnollisesta tulkinnasta. Pahimmillaan mittausten pohjalta on päädytty virheelliseen lopputulokseen ja tarpeettomiin korjauksiin varsinaisen ongelman jäädessä havaitsematta.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi toistuvasti eteen tulleita ongelmakohtia, niissä tehtyjä virheitä sekä pyritään antamaan ohjeita niiden välttämiseksi. Pääpaino on tulosten tulkinnassa ja siksi mittalaitteiden toimintaan ja käytännön mittausten suoritukseen liittyviä virheitä ei ole käsitelty kuin siltä osin, miten niillä on katsottu olevan suoraa vaikutusta tulosten tulkintaan.

## 2. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaaminen

Suhteellisen kosteuden (RH) mittaaminen on selkeästi yleisin ja monin tavoin myös tärkein rakennusten kuntotutkimuksiin liittyvä rakennusfysikaalinen mittausta. Tästä syystä myös siihen liittyvät virheet ja ongelmat ovat yleisiä.

Koko suhteellisen kosteuden käsite on jo teoreettiselta pohjaltaan sidottu lämpötilaan, eli on selvää, että lämpötila vaikuttaa RH-mittauksen tulokseen monella tavalla.

## 2.1 Mittausanturin ja mittausympäristön välinen lämpötilaero

Talvikaudella tehtyjen mittausten osalta on mahdollista, että ulkoa sisälle tuotuun mittalaitteeseen on voinut kondensoitua kosteutta (tämä oli ongelma erityisesti aiemmin yleisten sintrattujen suojakuorien yhteydessä), tällöin ensimmäiseksi mitatun mittapisteen tulos on korkea rakenteen oikeasta kosteudesta riippumatta.

Laajamittaisemmin tämä virhetekijä vaikuttaa tutkimuksissa, joissa talvikaudella mitataan kosteutta lämmöneristyskerroksesta tai sen takana olevasta materiaalista. Käytännön esimerkkinä mainittakoon seinän eristetilän kosteuden mittaaminen metallivartisella mitta-anturilla. Jos mittaus tehdään ulkopuolelta, niin anturin alhainen lämpötila ja anturin varren kautta tapahtuva lämmönjohtuminen alentavat mittauspisteen lämpötilaa, jolloin saadaan liian korkea suhteellisen kosteuden mittaustulos. Jos mittaus tehdään sisäpuolelta, niin samoista syistä saadaan liian alhainen mittaustulos. Jos osa mittauksista joudutaan käytännön esteiden takia tekemään sisäpuolelta ja osa ulkopuolelta (kantavan seinän paksu kuori tai säästettävät märkätilan seinäpinnat voivat pakottaa mittaajan ulkopuolelle ja osittain maanvastainen seinä voi pakottaa sisäpuolelle), niin virheellisten tulosten tulkitseminen voi antaa ensi katsomalla loogisen kuvan rakenteen kosteusvauriota.

Tällaisia ongelmia voidaan välttää mm. seuraavilla tavoilla:

- mitta-anturien kuljettaminen talvella povitaskussa auton takaluukun sijasta.
- antamalla mittalaitteiden mahdollisuuksien mukaan tasaantua mitattavaan lämpötilaan, tähän vaadittava aika voi olla jopa puolen tunnin luokkaa.
- käyttämällä johdon päällä olevia mitta-antureita, jolloin varren kautta johtuva lämpöenergia ei vääristä tulosta.

## 2.2 Mittaaminen termisesti epävakaa tilanteessa

RH-mittausten tulkinnessa pitäydytään usein ns. stationääri-tilan tulkitsemiseen, eli kuvitellaan, että mitattavan kohteen olosuhteet ovat tasaantuneet, kunhan porattu reikä ja reikään laitettu anturi ovat riittävän kauan tasaantuneet.

Valtaosa ulkoseinärakenteista ei kuitenkaan käytännössä koskaan ole stationääri-tilassa, vaan rakenteen yli vaikuttava lämpötilaero ja sen vaihtelu vuorokautisella tai pidemmällä vaihteluvälillä saa aikaan jatkuvaa kosteuden kulkeutumista rakenteen sisällä. Tästä syytä esimerkiksi mineraalivillaseinän sisään päässyt kosteus voi olla varastoituneena jäätyneeseen tuulensuojalevyyn ja vesivahingon takia kastunut seinä voi näyttää ihan kuivalta, jos sitä mitataan pakkaskauden aikana.

Tällaisia ongelmia voidaan välttää käyttämällä pitempikestoisia mittausjaksoja tai käyttämällä vaihtoehtoisia tutkimustapoja RH-mittauksen sijaan.

## 2.3 Eri nopeudella reagoivien mittauspisteiden vertaaminen

Usein kuntotutkimuksissa on ohjeiden mukaisesti ja sinänsä pätevästi tehtyjä kosteusmittauksia sisä- ja ulkoilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. On myös voitu mitata erilaisten rakenteiden sisään jäävien onkaloiden ilmatilan kosteutta ja lämpötilaa. Lähes yhtä usein näkee myös absoluuttisen kosteuspitoisuuden perusteella tehtyjä johtopäätöksiä siitä, onko rakenne kuiva vai märkä, tai vaikuttaako rakennukseen jokin ylimääräinen kosteuslähde.

Sisäilman kosteuspitoisuus seuraa periaatteessa ulkoilman kosteuspitoisuutta siten, että asumisesta syntyy tietty kosteuslisä sisäilmaan. Tutkimusten [1] perusteella tämä kosteuslisä vaihtelee suuresti ja pintamateriaalien puskuroiva vaikutus tekee siitä monessa tapauksessa ajoittain jopa negatiivisen. Tästä syystä ilmatilojen hetkellisistä mittauksista ei voida tehdä mitään päteviä johtopäätöksiä. Edes pidempiaikaisten seurantamittausten perusteella ei voida arvioida muuta kuin tilojen ilmanvaihdon riittävyttä.

Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden hetkelliset mittaukset eivät mielestäni ole tarpeellisia, eli virhetulkintoja voidaan parhaiten välttää luopumalla turhien mittausten tekemisestä. Jos on erityinen peruste sisä- ja ulkoilman olosuhteiden vertaamiseen, niin mittaus tulee tehdä vähintään muutaman vuorokauden mittaisena seurantamittauksena.

#### **2.4 Huokoisen materiaalin kosteuspitoisuuden tarkastelu huokosilman absoluuttisen kosteuspitoisuuden perusteella**

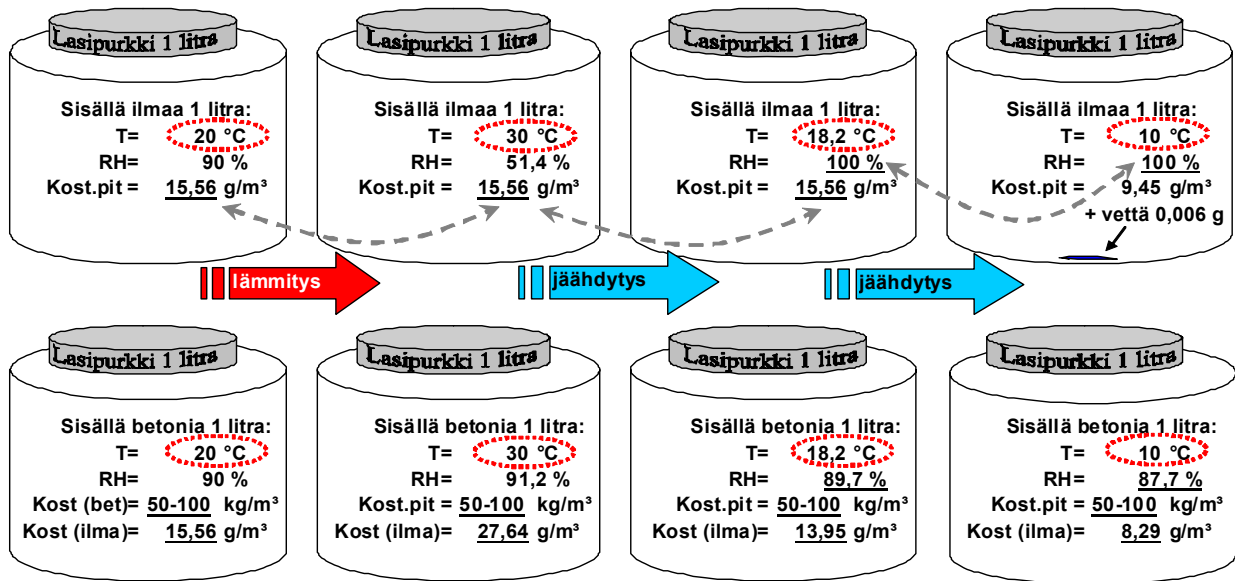
Lähes kaikki rakennusmateriaalit ovat huokoisia materiaaleja. Tällaisen materiaalin kosteutta voidaan mitata sen sisälle aikaansaadun tyhjätilan ilman suhteellisen kosteuden avulla.

Esimerkiksi, betoniin porataan reikä ja se tulpataan. Tämän jälkeen tarvitsee vain odottaa riittävä kauan, että reiän sisällä olevan ilman kosteuspitoisuus tasoittuu yhtä suureksi kuin ympäröivän rakenteen huokosten sisällä olevan ilman kosteuspitoisuus. Lähes aina eri mittauskohtien lämpötilat kuitenkin eroavat toisistaan ja tällöin mittaustulosten vertaaminen toisiinsa on vaikeaa.

Mitattujen suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvojen perusteella lasketaan usein paljonko mittauspisteen ilma sisältää kosteutta eli ilman absoluuttinen kosteusmäärä (esim.  $\text{g/m}^3$ ). Tämän kosteuspitoisuuden käyttäminen tulosten keskinäiseen vertailuun on väärin. Perustelut ja selventävät esimerkit on esitetty seuraavissa kappaleissa.

Ilmassa absoluuttisen kosteuspitoisuuden ja RH:n välinen suhde toimii tunnetusti siten, että lämpötilan noustessa RH laskee ja päinvastoin. Huokoisten materiaalien sisältämä vesi on kuitenkin pääosin nestemäisenä vetenä huokosten pinnoilla eikä huokosten sisältämässä ilmassa silloinkaan, kun sen kosteuspitoisuus on hygroskooppisella alueella. Tällöin huokosten sisältämän ilman kosteuspitoisuus ei käytäydy normaalin ilman tavoin, koska ilman RH:n laskiessa huokosten reunoilta höyrystyy lisää kosteutta ilmaan. Lämpötilan noustessa nesteen pinta-aktiivisuus kasvaa ja höyrystyminen tapahtuu helpommin, eli RH pyrkii nousemaan eikä laskemaan. Mitä suurempi on materiaalin sisältämän kosteuden määrä suhteessa sen huokostilavuuteen, sitä voimakkaampi tämä ilmiö on.

Selventävänä esimerkkinä voidaan ajatella vaikkapa lasipurkkiin suljettua melko kosteaa ilmaa, jonka lämpötila on  $+20\text{ °C}$  ja RH on 90 %. Sen sisältämä absoluuttinen kosteuspitoisuus on yleisesti käytettyjen likiarvokaavojen [2] mukaan  $15,56\text{ g/m}^3$ . Purkki on niin tiivis, että sen sisältämä kosteusmäärä ei pääse muuttumaan. Kun purkkia lämmitetään  $+30\text{ °C}$ , ilman RH laskee 51,4 % arvoon. Jos purkkia tämän jälkeen jäädytetään, niin lämpötilassa  $+18,2\text{ °C}$  ilman RH on 100 %. Jos lämpötila yhä laskee ja lopuksi tasoittuu  $+10\text{ °C}$  arvoon, on ilman RH edelleen 100 % mutta 1/3 ilman sisältämästä kosteudesta on tiivistynyt nesteeksi. Vastaavasti voidaan ajatella samanlaiseen lasipurkkiin valettua betonia, johon poratun reiän ilmatilan kosteutta mitataan. Jos  $+20\text{ °C}$  lämpötilassa mitataan 90 % RH, niin purkin sisällä ei olekaan 1,5 sadasosagrammaa vettä, vaan betonista riippuen 50 – 100 g (2,5 – 5 painoprosenttia). Ruotsalaisten [3] tutkimusten mukaan betonin sisältä mitattu kosteuspitoisuus nousee prosenttiyksiköllä huokosten pinnoilla olevan veden aktiivisuuden kasvaessa jos lämpötila nousee  $+30\text{ °C}$  tasolle. Vastaavasti lämpötilan laskeminen ei aiheuta RH:n nousemista ja kosteuden kondensoitumista, kuten pelkän ilman tapauksessa, vaan sen tippumisen muutamalla prosenttiyksiköllä.



Kuva 1. Esimerkki ilman ja betonin RH:n muuttumisesta lämpötilan funktiona.

RH mittaustulosten korjaaminen lämpötilan suhteen, etenkin suuren kosteuspitoisuuden omaavissa materiaaleissa (kuten esim. betoni ja tiili), on perusteltua vain jos lämpötila on poikkeuksellisen korkea (esim. kuivattavasta rakenteesta mitattava kosteuspitoisuus). Tällöin korjaus on tehtävä kirjallisuudesta saatavien arvojen mukaan, eikä ilman kosteuspitoisuuden laskukaavan avulla.

## 2.5 RH -mittaus sivuiltaan avoimesta reiästä

RH-mittaus toteutetaan usein ns. porareikä mittauksena etenkin kun mitataan kovia rakennusmateriaaleja kuten betonia. Tasomaisessa rakenteessa, kuten lattiassa tai seinässä, mittaustuloksen tulkintaan vaikuttaa aina mittaustason etäisyys kosteutta haihduttavista pinoista. Käytännössä tämä on nykyohjeistuksen mukaan sama asia kuin poraussyvyys, jos käytetään porareikään asennettavia tiiviitä putkiholkkeja.

1980-luvulta 1990-luvun puoleenväliin rakenteiden kosteusmittaukset tehtiin yleisesti mittarivalmistajan toimittamilla kertakäyttöisillä tulvilla, ns. punaiset tulpat olivat vakiokäytäntö koko maassa. Tällaiset tulpat oli suunniteltu asennettavaksi 50 mm syvyyteen porattavaan reikään ja tulpan yläpäässä olevat heltat tiivistivät tulpan 16 mm reikään. Tulpan sivut olivat avoimia, jolloin mittarin antama tulos vastasi karkeasti porareian keskimääräisessä syvyydessä vallitsevaa kosteustasoa. Mittaustapa ei mahdollistanut rakenteen kosteusjakauman tarkempaa analyysiä, mutta se ei tuolloin muutenkaan ollut tapana.

Vanhat tavat ovat hitaita kuolemaan. Nykyäänkin näkee miten kosteusmittauksessa käytetään vanhaa mittausholkkiarastoa. Tästä huolimatta reikien poraussyvyys voi vaihdella ja rakenteen kosteusjakautumaa arvioidaan poraussyvyyden perusteella. Lopputuloksena on lähes aina liian positiivinen kuva rakenteen kosteudesta.





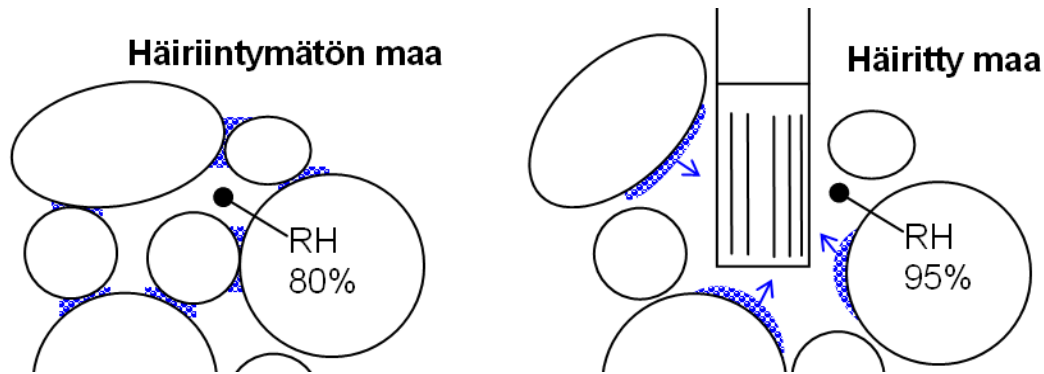
*Kuva 2. Esimerkki nykyaikaisen kosteusmittausanturin ja vanhojen mittausholkkien käyttämisestä samassa kohteessa.*

Vastaava ongelma ja virhetulkinta syntyvät, kun mittauksessa ei käytetä lainkaan erillistä putkea vaan mittaus-anturi tiivistetään suoraan reiän yläpintaan. Tätä virhettä näkee tapahtuvan melko yleisesti kun käytetään ohuita kiinteävirtaisia puikkoantureita.

## **2.6 Mittauskohdan häiriintyminen**

Vesivahinkojen jälkeisten vauriokartoitusten yhteydessä näkee usein mitattavan maanvaraisen lattian eri rakennekerrosten, eli betonin, eristeen ja alapuolisen soratäytön kosteutta. Tällöin mittaus yleensä tehdään siten, että ensin porataan betoniin reikä, joka putkitetaan ja sen annatetaan tasaantua. Betonin kosteuden mittaamisen jälkeen samaa reikää käyttäen porataan koko betonilaatan läpi alapuolella olevaan eristeeseen. Porareian jäähtymisen jälkeen voidaan kiinteävirtainen anturi työntää kokonaan eristeen sisään. Solumuovieristeiden tapauksessa eristeen kosteus voidaan melko hyvin mitata, kunhan mittaus ei ole osunut levysauman kohdalle. Tämän jälkeen sama anturi työnnetään eristeen läpi sora/hiekkatäyttöön ja täytön kosteus voidaan kirjata lyhyen odotusajan jälkeen. Tulosten perusteella on joissain tapauksissa päädytty rakenteen alapuolisen soratäytön koneelliseen kuivaukseen.

Merkittävin virhe tapahtuu tässä tapauksessa siinä, että häiriintymättömässä tilanteessa hiekkatäytön sisältämä kosteuspitoisuus on yleensä vähintään 2 paino-% vaikka siinä ei olisikaan kapillaarisesti kulkeutuvaa kosteutta. Tämä vesimäärä on hiekkarakeiden kosketuskohdissa pintajännitysvoimien sitomana. Kun hiekkaa häiritään mitta-anturilla, niin rakeiden keskinäinen asema muuttuu ja alunperin rakeiden kosketuspintoihin kertynyt vesi levittäytyy rakeiden pinnoille. Pinnalta vapaasti haihtuva vesi nostaa rakeiden välissä olevan ilman suhteellista kosteutta. Tilanne tasaantuu ajan saatossa ylimääräisen kosteuden kulkeutuessa diffuusiolla kauemmas maakerrokseen.



Kuva 3. Karkean maalajin tasapainokosteuden muuttuminen häiriön seurauksena.

Virheen merkitystä voidaan vähentää antamalla anturin tasaantua hiekassa vähintään vuorokauden ja seuraamalla mittaustuloksen muuttumista. Jos mittausten tarkoituksena on arvioida hiekan sisältämää vesimäärää, niin avauskohdista otettavat kuivaus-punnitus -näytteet antavat parempaa tietoa.

### 3. Yhteenveto

Alun perin ajatuksena oli kerätä tekstiin kaikenlaisten mittausten virhetulkintoja, mutta kirjoitustyön aikana esiin nousseet asiat kuitenkin liittyivät aina kosteuden ja lämpötilan mittaamiseen.

Mittaustulosten tulkinnessa joudutaan aina hieman yksinkertaistamaan todellisen rakenteen ja sen ympäristön kaoottisuutta, lähes aina tulkintaan käytettävissä olevat tiedot olosuhdevaihteluista ja itse materiaalien ominaisuuksista, ovat puutteellisia. Yleisimmät ja merkittävimmät virhetulkinnat ovat yleensä seurausta huokoisen materiaali ja puhtaan ilman erilaisesta käyttäytymisestä etenkin muuttuvissa lämpötilaolosuhteissa.

### Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio. 102 s. + 10 liites
- [2] Nevander, L. E. ja Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok. 2.painos. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst och författarna. 538 s.
- [3] Goran Hedenblad, 1997, Drying of construction water in concrete

## **4. Julkisivurakenteet**



# Pakkasenkestävyydeltään puutteellisten betonijulkisivujen korjausmahdollisuudet

Jukka Lahdensivu  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

TTY:llä käynnissä olevan *BeKo-Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjausstrategiat* - tutkimuksen yhteydessä on koottu 946 rakennuksen kuntotutkimustiedot tietokantaan. Tämän havaintoaineiston perusteella esimerkiksi parvekkeiden suojahuokossuhteista 59 % alittaa arvon 0,10. Tätä pidetään huokostuksen täydellisenä epäonnistumisena. Ohjeistuksen mukaan suojahuokossuhteen tulisi suomalaisissa ulko-olosuhteissa olla  $> 0,20$ . Tämän arvon ylittää vain 12 % em. rakenteista. Tilanne on aivan samansuuntainen betonijulkisivuissa, joissa betonin lujuus on tosin ollut vain K20-25 kun se on parvekkeissa ollut K25-30. Tästä huolimatta huomattavan suuressa osassa em. rakenteita näkyviä rapautumavaurioita on huomattavan vähän, laaja-alaisia vaurioita 5-14 %:ssa rakenteista rakennuksen sijainnista riippuen. Merkittävää kuitenkin on, että noin 70 % rakenteista ei ole silmämääräisesti havaittavia rapautumavaurioita ollenkaan. Tilanne on samaa suuruusluokkaa myös tarkempien tutkimusmenetelmien, eli betonin vetolujuusmittausten ja ohuthieanalyysien perusteella.

## 1. Johdanto

### 1.1 Taustaa

Suomen rakennuskannasta valtaosa, noin kolme neljäsosaa on rakennettu 1960-luvulla tai sen jälkeen. Tässä rakennuskannassa on noin 44 miljoonaa neliometriä betonijulkisivuja ja lähes miljoona betoniparveketta [1].

Huomattavan nuoresta rakennuskannasta huolimatta niiden kunnossapidossa ja korjaamisessa on törmätty useisiin ongelmiin. Rakenteita vaurioittavat useat eri turmeltumisilmiöt, joiden etenemiseen puolestaan vaikuttavat monet rakenteelliset, olosuhde- ja materiaalitekijät. Näin ollen rakenteiden käyttöiät vaihtelevat käytännössä paljon. Rakenteisiin on syntynyt monesti odottamatonta ja teknisesti sekä kustannuksiltaan merkittävää korjaustarvetta jo varhain, jopa alle 10 vuoden iässä. Tästä syystä Suomessa on kehitetty viimeisen 20 vuoden aikana runsaasti aivan uutta tekniikkaa ja toimintatapoja betonirakenteiden kunnossapitoon ja korjaamiseen. Näitä ovat mm. maailmanlaajuisesti ainutlaatuinen rakenteiden kuntotutkimusmenettely ja sen laaja hyödyntäminen, erilaiset korjausratkaisut eri vaurioitilanteisiin sekä laadukkaat korjaustuotteet ja korjausten toimiva rakennuttamismenettely.

Merkittävimpiä betonirakenteiden vaurioita ei voi silmin havaita ennen kuin ne ovat edenneet hyvin pitkälle. Tämä seikka sekä vaurioitilanteen suuri vaihtelu eri talojen välillä tekevät perusteellisen kuntotutkimuksen tarpeelliseksi useimmissa julkisivukorjauskohteissa.

On huomattavaa, että julkisivukorjaukset tehdään lähes poikkeuksetta projektiluonteisesti yksittäisinä korjauskohteina, jolloin rakenteita korjattaessa niiden todellisesta kunnosta ja vaurioitumiseen vaikuttaneista tekijöistä jatkuvasti kertyvää uutta tietoa ei ole kerätty yhteen.

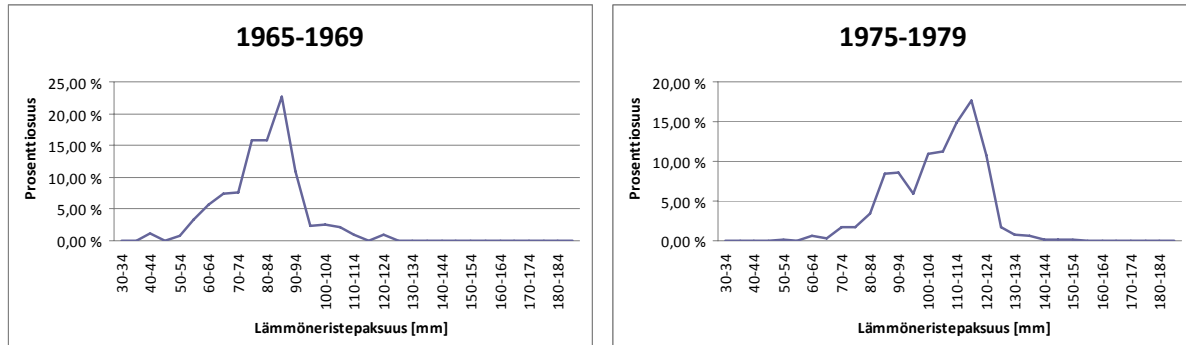
Tämän johdosta vilkkaasta korjaustoiminnasta huolimatta ei ole syntynyt riittävästi tietoa ja näkemystä mm. siitä, millainen olemassa olevan betonijulkisivukannan todellinen kunto on ja miten korjaustarve tulevaisuudessa kehittyy sekä siitä, mitkä tekijät ovat pohjimmiltaan olleet vaikuttamassa vaurioitumisen alkamiseen.

## 1.2 Betonijulkisivu- ja -parvekerakenteet

Betonielementtijulkisivut ovat olleet yleisin julkisivurakenne suomalaisissa asuin- ja liikerakennuksissa 1960-luvun lopulta lähtien Elementtirakentamisen suurimmat volyymit ajoittuvat 1960-luvun lopusta 1980-luvun alkuun. Tyypillisin julkisivuelementti on ollut ns. sandwich-elementti, joka koostuu betonisesta ulkokuoresta, suunnittelupaksuus aikakaudesta riippuen 40 – 85 mm, lämmöneristekerroksesta, joka on tyypillisesti ollut mineraalivillaa, sekä sisäkuoresta, jonka suunnittelupaksuus on ollut joko 70 mm (ei-kantava) tai 150 mm (kantava). Betonin lujuus on elementtirakentamisen alkuvuosina ollut melko alhainen, luokkaa K20.

Ulko- ja sisäkuori on kiinnitetty toisiinsa erilaisilla teräsosilla, jotka 1960-luvun loppupuolella vakiintuivat nykyisinkin käytössä oleviin teräsansaisiin. 1960-luvun elementtituotannossa ansaiden diagonaaleissa käytettiin vielä yleisesti ruostuvaa teräslaatua, mutta 1970-luvulle tultaessa ansaiden diagonaalit ovat olleet lähes poikkeuksetta ruostumatonta halkaisijaltaan 5 mm terästä.

Lämmöneristeen suunnittelupaksuus on vaihdellut välillä 70 – 140 mm aikakauden lämmöneristysvaatimusten mukaan. Todellinen lämmöneristeen paksuus on ollut suunniteltua pienempi ja siinä on melkoisesti vaihtelua elementtien valun yhteydessä tapahtuneen lämmöneristeen kokoonpuristumisen seurauksena, kuten kuvista 1 a ja b voidaan havaita.



Kuva 1a ja b. Betonijulkisivujen kuntotutkimusten yhteydessä mitattujen lämmöneristeiden paksuusjakaumia vuosilta 1965 - 1969 (a) ja 1975 - 1979 (b).

Kaikkein yleisin betoniparveke 1960-luvun lopusta aina nykypäivään saakka on omilla perustuksillaan seisova ns. parveketorni, joka koostuu kantavista pieliseinistä (tai osin pilareista), laatasta sekä kaiteesta. Parveketorni on sidottu rakennuksen runkoon vain vaakavoimille joko sinkittyjen tai ruostumattomien teräsosien välityksellä. Kantavien pielielementtien paksuudet ovat olleet tyypillisesti välillä 150 - 180 mm. Tyypillisesti pielielementeissä on vain pieliteräkset, sillä ne on suunniteltu raudoittamattomiksi rakenteiksi. Betonikaiteet sen sijaan on raudoitettu molemmista pinnoistaan varsin runsaasti. Kaiteiden tyypillinen suunnittelupaksuus on ollut välillä 70 – 85 mm, joten raudoitteidenpeitepaksuudet ovat usein jääneet varsin vaatimattomiksi.



Kuva 2a ja b. Tyypillinen betonielementtikerrostalo 1970-luvulta (a), jossa sekä julkisivut että parvekkeet ovat betonielementtejä. Pitkälle edennyt ja laaja-alaista teräskorroosiota parvekekaiteessa (b).

### 1.3 Tavoitteet

Tämä paperi perustuu kirjoittajan kokemuksiin noin 150 betonijulkisivun kuntotutkimuksesta, pitkään jatkuneeseen kuntotutkimus systematiikan kehittämiseen sekä käynnissä olevaan projektiin *Betonijulkisivujen ja –parvekkeiden korjausstrategiat*. Tutkimuksen pääimmäisenä tavoitteena on selvittää tekijöitä, jotka todellisissa luonnonolosuhteissa ovat vaikuttaneet betonijulkisivujen- ja parvekkeiden käyttöikään sekä vaurioiden olemassaoloon ja etenemiseen. Kolme keskeisintä tavoitetta ovat:

1. Löytää olemassa olevasta rakennuskannasta ne tekijät, joilla on aidoissa luonnonolosuhteissa ollut vaikutusta vaurioiden olemassaoloon ja etenemiseen.
2. Selvittää näiden tekijöiden suhteellinen merkitys vaurioiden etenemiseen sekä korjaustavan valintaan.
3. Luoda uutta luotettavaa tietoaineistoa betonijulkisivujen ja –parvekkeiden käyttöiästä laskennallisten käyttöikä- ja –kustannusmallien pohjaksi.

Tutkimus käynnistyi maaliskuussa 2006 ja päättyi joulukuussa 2009.

## 2. Tietokannan luominen

### 2.1 Betonijulkisivujen ja –parvekkeiden kuntotutkimus

Kuntotutkimuksella tarkoitetaan rakennusosan tai rakennusosakokonaisuuden (esimerkiksi julkisivun tai parvekkeiden) kunnan ja toimivuuden sekä korjaustarpeen selvittämistä systemaattisesti eri vauriotapojen suhteen käyttäen erilaisia tutkimusmenetelmiä, joita ovat mm. suunnitelma-asiakirjojen tarkasteleminen, erilaiset kentällä tapahtuvat mittaukset ja tutkimukset sekä näytteenotto ja laboratoriotutkimukset. Kuntotutkimuksella voidaan saada selville tutkimushetkellä olemassa olevien vaurioiden syyt, laajuus ja vaikutukset sekä tämän lisäksi myös tulevaisuudessa syntyvät vauriot jo siinä vaiheessa, kun varsinaisia näkyviä vaurioita ei ole olemassa. Tällaisessa tapauksessa oikein ajoitetuilla kunnossapitotoimilla voidaan usein hidastaa tehokkaasti vaurioiden etenemistä ja siirtää raskaita korjaustarpeita tulevaisuuteen.

## 2.2 Tietokanta

Kuntotutkimussystematiikkaa on kehitetty 1980-luvun puolivälistä lähtien ja se on ollut 1990-luvun alusta saakka keskeinen osa lähes jokaista julkisivukorjausprosessia. Toteutetuista korjauskohteista on tallentunut jopa maailmanlaajuisesti ainutlaatuinen aineisto kuntotutkimuksissa laadittujen dokumenttien muodossa, joista jokaisesta on olemassa tarkasti dokumentoitu aineisto käsittäen mm. kohteiden rakenteet sekä tarkat kenttämittauksiin ja laboratoriotutkimuksiin perustuvat havainnot rakenteissa esiintyneistä vaurioista ja korjaustarpeesta.

TTY:llä käynnissä olevan *BeKo-Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjausstrategiat* - tutkimuksen yhteydessä on koottu 946 rakennuksen kuntotutkimustiedot tietokantaan. Aineisto tarjoaa mahdollisuuden mm. tehdä systemaattisesti kerättyihin kuntotietoihin pohjautuvan luotettavan arvion betonijulkisivujen ja -parvekkeiden kunnan, korjaustarpeen ja korjausmarkkinoiden kehityksestä.

## 3. Betonirakenteiden vaurioituminen

### 3.1 Vauriomekanismeista yleisesti

Yleisimmät betonijulkisivujen korjaustarvetta aiheuttavat vauriomekanismit ovat raudoitteiden korroosio joko betonin karbonatisoitumisen seurauksena tai kloridien käynnistämänä sekä betonin puutteellisesta pakkasenkestävyydestä johtuva pakkasrapautuminen [2].

Seuraavat betonijulkisivujen ja -parvekkeiden vaurioitumista käsittelevät tulokset perustuvat BeKo-tietokannasta tehtyihin havaintoihin ja päätelmiin.

### 3.2 Raudoitteiden korroosio

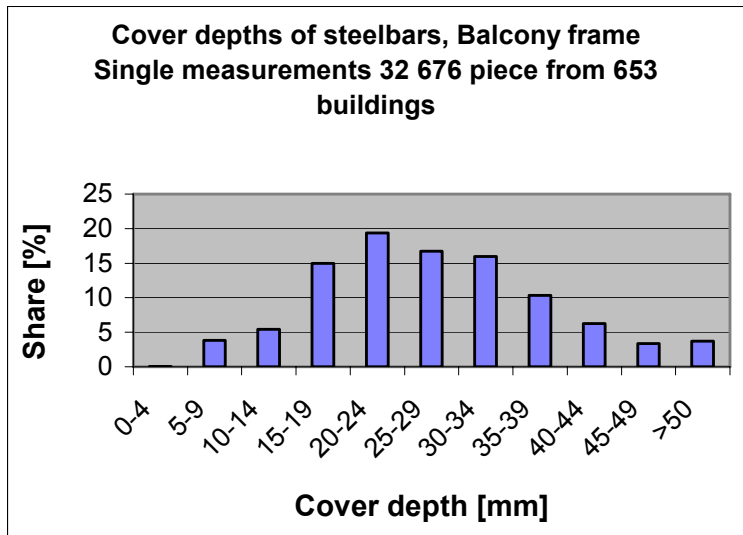
Betonissa olevat raudoitteet ovat yleensä hyvin korroosiolta suojassa, koska betonin huokosveden korkean alkalisuuden, pH luokkaa 13, ansiosta terästen pinnalle muodostuu ns. passiivikalvo, joka estää korroosion. Korroosiosuojaus on virheettömässä rakenteessa hyvin pysyvä, koska passiivikalvo on itseään jatkuvasti korjaava ja terästä suojaava betonikerros hidastaa tiiviydellään ja yhtenäisyydellään erilaisten korroosiota aiheuttavien aineiden (hapot, kloridit, sulfaatit) pääsyä raudoitteiden pinnalle. Korroosio saattaa kuitenkin käynnistyä, jos suojabetonin tiiviyys ja/tai paksuus ovat puutteellisia.

Teräksen passiivisuuteen perustuva korroosiosuoja voidaan menettää ja korroosio voi käynnistyä joko raudoitteita suojaavan betonin huokosveden alkalisuus betonin karbonatisoitumisen myötä tai kloridien vaikutuksesta. Betonijulkisivuissa ja parvekkeissa on mahdollista, että betonimassaan on valmistuksen yhteydessä sekoitettu klorideja nopeuttamaan betonin kovettumista. Klorideja on käytetty lähinnä 1960-luvulla työmaavaliuissa ja -valimoissa kylmänä vuodenaikana, jolloin betonin kovettuminen on hidasta. Klorideja voi tunkeutua myös kovettuneeseen betoniin, mikäli betonipinta altistuu ulkoiselle kloridirasitukselle esim. liukkaudentorjunta- tai pölynsidontasuolojen tai merivesiroiskeiden vaikutuksesta. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden osalta nämä kloridirasitustekijät ovat suhteellisen harvinaisia ja vaikutuksiltaan yleensä paikallisia.



Sekä karbonatisoitumisen että erityisesti kloridien aiheuttamaa betoniterästen korroosiota on tutkittu hyvinkin laajasti mm. lähteissä [3; 4; 5; 6; 7] jne.

Betonin karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion selvittämiseksi verrataan terästen peitepaksuusjakaumaa betonin karbonatisoitumissyvyyteen, ks kuva 3. Betonin karbonatisoituminen ei ole aivan tasaista johtuen mm. eroista karbonatisoituvan aineksen määrässä sekä olosuhteissa. Betonin karbonatisoitumisnopeutta kuvataan yleisesti ns. Tuutin mallin mukaisesti karbonatisoitumiskertoimella  $k$  [mm/ $\sqrt{a}$ ].



Kuva 3. Kaikkien tietokannan parvekekaiteiden ulkopinnan peitepaksuusjakauma.

Keskimääräinen karbonatisoitumisnopeus  $k$  [mm/ $\sqrt{a}$ ] parvekekaiteiden ulkopinnassa on 2,60 ja sisäpinnassa 2,91. Vastaavasti parvekepielessä arvot ovat 2,10 ja 2,15.

Karbonatisoitumiskertoimien keskihajonta on huomattavan suurta, näissä esimerkkitapauksissa 1,31 – 1,51. Karbonatisoitumisnopeus on merkittävästi pienempää 1980-luvun lopun ja sitä uudemmassa rakennuskannassa johtuen mm. korkeammista betonilujuuksista (K30 – K45).

Kloridikorroosion käynnistymisen raja-arvona pidetään sekä kansainvälisessä kirjallisuudessa että suomalaisissa ohjeissa [8]  $\geq 0,05$  paino-% kloridipitoisuutta betonin painosta. Tämän kynnsarvon ylittää vain neljän rakennuksen betonielementit koko tietokannan 946:sta rakennuksesta. Klorideiden aiheuttama korrosio ei siis ole suomalaisten betonijulkisivujen ja –parvekkeiden yleinen ongelma.

### 3.2.1 Aktiivinen korrosio ja näkyvät vauriot

Teräskorroosio voi käynnistyä vasta, kun teräsiä suojaava passivointi on tuhoutunut joko kloridien tai betonin karbonatisoitumisen vaikutuksesta [4]. Korrosio voi edetä huomattavankin pitkään ennen kuin se näkyy suojabetonipeitteen rikkoutumisena. Korrosiotuotteet eivät ole vesiliukoisia, joten kerääntyvät teräksen pinnalle anodisen alueen läheisyyteen [9]. Tästä aiheutuu betoni sisään painetta, koska korrosiotuotteiden tilavuus on 4 – 6 kertaa alkuperäistä terästä suurempi [3].

Näkyviä korrosiovaurioita esiintyy ensimmäisenä alueilla, joissa raudotteiden peitepaksuus on pienin ja ne altistuvat saderasitukselle. Tyypillisesti näkyvien korrosiovaurioiden määrä ja aste riippuvat rakennuksen iästä. Kaikissa tietokannassa olevissa rakennuksissa on esiintynyt

kuntotutkimushetkellä joko pieniä paikallisia tai jo pitkälle edenneitä ja laaja-alaisia näkyviä korroosiovaurioita.

### 3.3 Betonin rapautuminen

Betonin rapautumiseksi kutsutaan vaurioitumista, jossa betonin rakenteeseen syntyy säröjä ja halkeamia säärasituksen seurauksena. Rapautuminen johtaa edetessään lopulta betonin lujuuden ja koossapysyvyyden menetykseen. Betonijulkisivuissa ja –parvekkeissa rapautumista voi tapahtua seuraavien rapautumisilmiöiden vaikutuksesta:

- pakkasrapautuminen
- ettringiittireaktio ja
- alkalikiviainesreaktio.

Suomen olosuhteissa ja suomalaisissa betonijulkisivuissa ja -parvekkeissa pakkasrapautuminen on selvästi merkittävin rapautumisilmiö. Muut rapautumisilmiöt ovat huomattavasti harvinaisempia, mutta yksittäistapauksissa kuitenkin mahdollisia. Eri rapautumisilmiöiden aiheuttamat näkyvät vauriot ovat hyvin samankaltaisia, joten rapautumisen syyn tarkempi selvittäminen edellyttää laboratoriotutkimuksia.

### 3.4 Betonin pakkasenkestävyys

Pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosverkostossa olevan veden jäätymislaajenemisen aiheuttamasta hydraulisesta paineesta. Huokosverkostoon pääsee vettä esimerkiksi viistosateen ja sulavan lumen vaikutuksesta. Talvikautena rakenteen kuivuminen on hidasta alhaisesta lämpötilasta, korkeasta ilman suhteellisesta kosteudesta ja vähäisestä auringon säteilystä johtuen. Lämpötilan aleneminen jäätympisteeseen alapuolelle voi olla nopeaa.

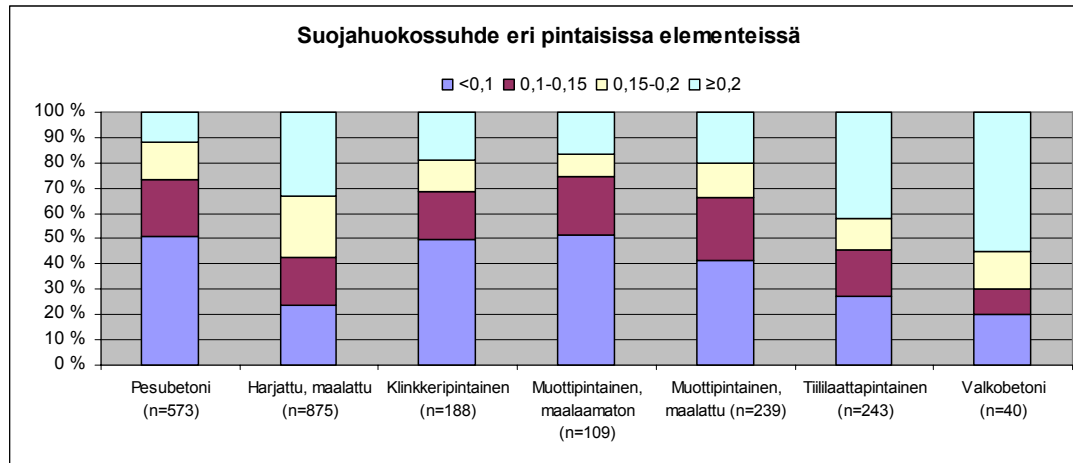
Vapaa vesi laajenee jäätyessään noin 9 tilavuusprosenttia. Vesi ei käyttäydy huokoisen materiaalin huokosrakenteessa samalla tavalla kuin ns. vapaa vesi, vaan materiaalin sisältämät eri kokoluokan huokokset vaikuttavat oleellisesti siihen, miten vesi materiaalin sisällä käyttäytyy mm. toistuvassa jäätyemisessä ja sulamisessa. Tämä johtuu siitä, että lämpötilavaihteluihin liittyvät veden fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt ovat suhteessa veden pintakemialliseen ja –fysikaaliseen käyttäytymiseen erilaisissa huokosissa. Huokoisen materiaalin pakkasvaurioitumiselle on esitetty maailmassa yli 15 erilaista teoreettista mallia tai selitystä, joista useimmat on kehitetty betonille. Useat kehitetyt teoriat ja mallit ovat toisiaan tukevia ja täydentäviä [10].

Pakkasräöilyyn syntyminen voidaan estää ns. lisähuokoistuksella, joka tarkoittaa, että betonimassaan voidaan valmistusvaiheessa muodostaa suhteellisen suurikokoisia ns. suojahuokosia, jotka pysyvät kaikissa olosuhteissa ilmatäytteisinä ja joihin veden jäätyminen aiheuttama paine voi purkautua aiheuttamatta vaurioita. Suomen betoninormeihin vaatimus pakkasenkestävyyden varmistamisesta lisähuokostamalla tuli 1976 [8].

Suuruusluokaltaan noin 10 µm suurempia huokosia voidaan pitää pakkasenkestävyyden kannalta hyödyllisinä. Käytännössä keskimääräinen suojahuokosten halkaisija on suuruusluokkaa 150 - 300 µm. Suojahuokosten koon lisäksi niiden keskinäisen etäisyyden tulee olla riittävän pieni, jotta jäätyvällä vedellä on mahdollisuus päästä niihin.

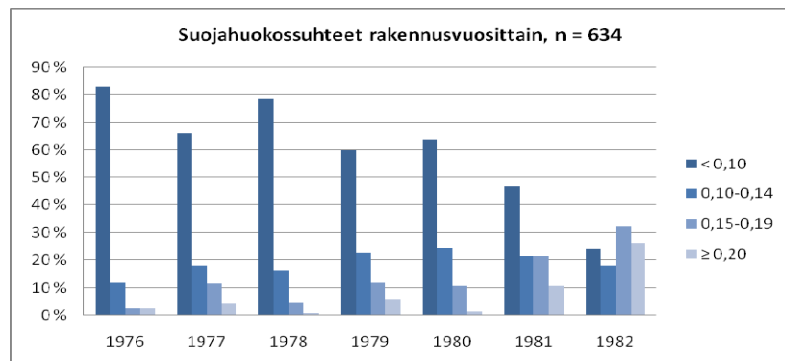
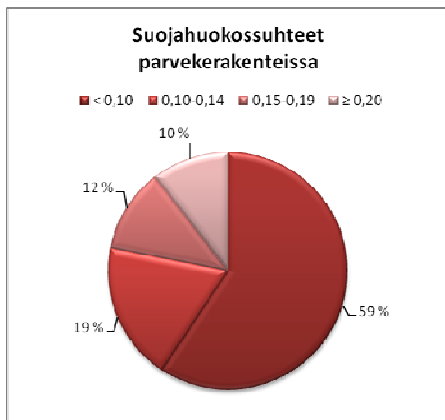
Tavanomaisissa suomalaisissa ulko-olosuhteissa suojahuokossuhteen  $p_r$  tulee olla  $\geq 0,20$ . Todelliset suojahuokossuhteet vaihtelevat eri julkisivupinnoilla kuitenkin suuresti, kuten kuvasta

4 voidaan havaita. Suojahuokossuhteen ollessa  $< 0,10$  betonissa ei ole suojahuokostusta ollenkaan ja käytännössä sellaista betonia pidetään kosteusrasituksessa pakkasta kestävämmänä. Heikoin pakkasenkestävyys on pesubetonipintaisilla, klinkkeripintaisilla sekä erilaisilla muottipintaisilla julkisivuilla. Näissä noin 50 % suojahuokossuhteista on  $< 0,10$ .



Kuva 4. Erilaiden betonijulkisivujen suojahuokossuhdejakaumat tietokannassa [11].

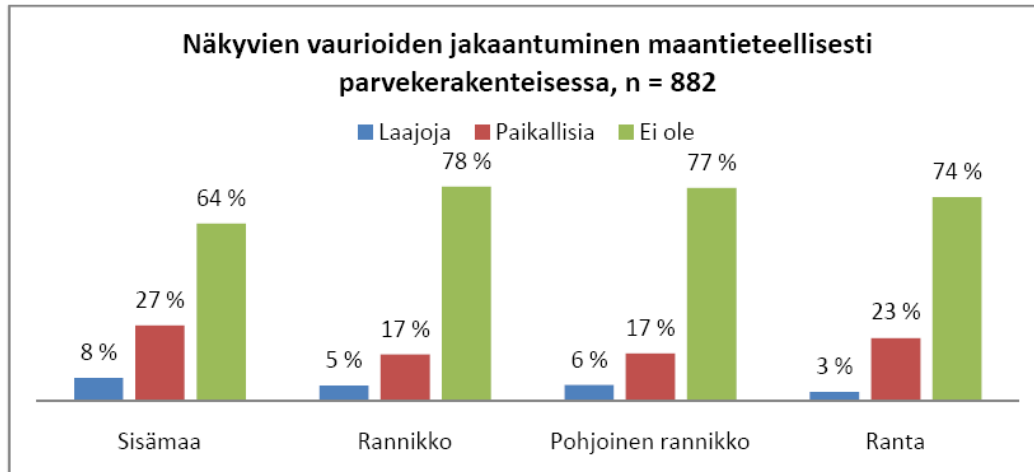
Parvekkeiden kohdalla tilanne on samansuuntainen kuin julkisivuissa. 59 %:ssa parvekkeista suojahuokossuhde on  $< 0,10$ , 19 % on välillä  $0,10 - 0,14$  ja 10 % välillä  $0,15 - 0,19$ . Vain 12 % parvekerakenteista täyttää betoninormien vaatimuksen  $\geq 0,20$  (mittaukset 1907 näytteestä).



Kuva 5a ja b. Betoniparvekkeiden suojahuokossuhdejakaumat tietokannassa (a) ja suojahuokossuhdejakaumat vuosittain [12].

Sekä julkisivujen että parvekkeiden suojahuokossuhteet ovat yleisesti parempia 1980-luvun alkupuolelta lähtien. Tähän on syynä lisähuokostuksen systemaattinen käyttöönotto betonielementtien valmistuksessa sekä huokostuksen mittausmenetelmien kehittyminen 1980-luvulle tultaessa.

Todellisella kosteusrasitustasolla sekä rakenteiden kosteusteknisellä toiminnalla on suuri merkitys pakkasvaurioiden esiintymiseen huonosti pakkasta kestävässä betonirakenteissa. Huolimatta suomalaisten betonijulkisivujen ja -parvekkeiden huonosta pakkasenkestävyydestä pitkälle edenneitä näkyviä pakkasrapautumavaurioita on kuitenkin melko vähän, kuten parvekkeiden osalta kuvasta 7 voidaan todeta.



Kuva 7. Näkyvät pakkasvauriot tietokannan betoniparvekkeissa [12].

#### 4. Korjausmahdollisuudet

Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjaustavat on yleisesti jaettu kolmeen pääluokkaan, jotka ovat:

- paikkaus- ja pinnoitustyyppiset korjaukset
- vaurioituneen rakenteen verhouskorjaukset sekä
- vaurioituneen rakenteen purkaminen ja uusiminen.


Näihin korjausperiaatteisiin voi liittyä myös muita ns. liittyviä korjauksia, joilla pienennetään korjatulle rakenteelle tulevaa saderasitusta. Tällaisia korjauksia voivat olla esim. elastisten saumojen uusiminen, parvekelasituksen asentaminen, vedenpoistojärjestelmän toiminnan parantaminen tai ulkonevien räystäiden rakentaminen.

Rakennuksen ulkonäön säilyttävät ns. kevyet paikkaus- ja pinnoituskorjaukset ovat soveltuvia sellaisille rakenteille, joissa vaurioituminen on vasta alkanut ja on vielä paikallista. Säilyttävä korjaus on perustelua myös sellaisissa tapauksissa, joissa vaurioita ei vielä ole nähtävissä mutta niitä on tulevaisuudessa odotettavissa esimerkiksi betoninpuutteellisen pakkasenkestävyyden vuoksi tai terästen pienten peitepaksuuksien johdosta. Tällaisia suojaavia korjaustoimia ovat:

- elastisten saumojen uusiminen
- julkisivun tai parvekkeen maalipinnan uusiminen päällemaalauksella
- julkisivun parvekkeen maalipinnan uusiminen suojaavalla pinnoitteella
- vanhan maalipinnan poisto, perusteellinen laastipaikkaus ja suojaava pinnoitus.

Kaikille julkisivupinnoille ei ole mahdollista tehdä ulkonäön säilyttäviä korjauksia yhtä helposti. Esimerkiksi pesubetonijulkisivun laastipaikkaus kohteessa, jossa on korkeat ulkonäkövaatimukset, on äärimmäisen haastavaa. Pesubetonijulkisivua, kuten ei myöskään klinkkeripintaista julkisivua ole mahdollista maalata suojaavalla pinnoitteella. Säilyttävien korjausten hyväksyttävän ulkonäön saavuttamiseen vaikuttavia seikkoja eri pintastruktuureille on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Säilyttävien korjausten hyväksyttävän ulkonäön saavuttamiseen vaikuttavia asioita [13].

	Olemassaolevat ja odotettava vaurioituminen	Säilyttämisen vaikeus betonipinnan tyypistä riippuen
	<p><b>Ei olemassaolevia tai odotettavia vaurioita</b>            Rapautuminen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• betoni on pakkasenkestävää</li> <li>• ei alkali-kiviainesreaktiota</li> </ul> <p>Korroosio:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• betonipeite on riittävä ja</li> <li>• betoni ei sisällä klorideja</li> </ul> <p>Ei rakenteellisia ongelmia</p> <p><b>Vain paikallisia olemassaolevia tai odotettavia vaurioita</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ts. vaurioituminen ei odoteta laajenevan tulevaisuudessa</li> </ul> <p><b>Vaurioituminen on mahdollista, mutta laaja-alaista näkyvää vaurioitumista ei vielä esiinny. Ei rakenteellisia ongelmia</b>            Rapautuminen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• betoni ei ole pakkasenkestävää ja/tai</li> <li>• alkali-kiviainesreaktio on mahdollinen</li> </ul> <p>Korroosio:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• betonipeite on riittämätön ja betoni on pitkälle karbonatsoitunut ja/tai</li> <li>• betoni sisältää klorideja lähellä pintaa</li> </ul> <p><b>Laaja-alaisia vaurioita ja/tai vakavia rakenteellisia ongelmia</b></p>	<p>Maalattu muottipintainen betoni            Julkisivun betonipinta voidaan pinnoittaa</p> <p><b>Pintastruktuurit:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pinnoittamaton muottipintainen betoni</li> <li>• Harjattu betonipinta</li> <li>• Pesubetoni</li> <li>• Keraamiset laatat tai tiilet</li> <li>• Pinnoittamaton väribetoni</li> <li>• Kuvioitu betonipinta</li> <li>• Erikoiset betonipinnan muotoilut</li> </ul>

Mikäli betonirakenteiden vaurioituminen on edennyt niin pitkälle, että säilyttävät korjaukset eivät ole enää taloudellisesti järkeviä, eikä niillä ole mahdollista saavuttaa korjaukselta tavoiteltavaa käyttöikä, on käytettävänä erilaisia peittäviä korjausvaihtoehtoja. Peittäviin korjauksiin kuuluu tyypillisesti julkisivujen kohdalla lisälämmöneristys. Erilaisia julkisivuvaihtoehtoja voivat olla:

- rappaus (ohut- tai paksueristerappaus)
- erilaiset rankaan kiinnitettävät julkisivulevyt, kuten metallikasetit, kuitusementtilevyt, polymeerikomposiitit jne.
- kuorimuuri
- uusi betonielementti.

Mikäli betonirakenne on vaurioitunut jo niin pitkälle, että uuden pintarakenteen luotettava kiinnittäminen siihen ei ole enää mahdollista, tulee rakenne purkaa. Rakenteen purkamisen ja korvaaminen uudella on tyypillistä erityisesti parvekkeissa.

## 5. Päätelmät

Raudoitteiden korroosio sekä betoni pakkasrapautumien ovat yleisimmät korjauksiin johtaneet vauriomekanismit. Tällöinkin kyseessä on ollut ensisijassa ulkonäön heikentyminen sietokynnyksen alapuolelle. Rakenteellinen turvallisuus on ollut vain muutamissa yksittäistapauksissa ensisijainen ja korjauksia kiirehtivä syy.

Suomalaisten betonielementtikerrostalojen betoni on suurelta osin kosteusrasituksessa pakkasta kestäväntä erityisesti ennen 1980-luvun puoliväliä rakennetussa kannassa. Tästä huolimatta yli 60 % betonijulkisivuista ja –parvekkeista ei ole ollenkaan näkyviä rapautumavaurioita. Tämä tarkoittaa, että kosteusrasitustasoa alentavalla ennakoivalla huollolla ja suojaavilla pinnoitteilla näiden rakenteiden käyttöikä voidaan lisätä noin 30 vuodella.

## Lähdeluettelo

- [1] Vainio et al. 2005. Julkisivujen uudis- ja korjausrakentaminen. Tampere. VTT 26 s. + 13 liites.
- [2] Pentti M, Mattila J, Wahlman J. 1998. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus, Osa I: Rakenteet, vauriot ja kunnan tutkiminen. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. Julkaisu 87. 157 s.
- [3] Tuutti K. 1982, Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Research 4:82. 304 p.
- [4] Parrott L.J. 1987, Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. Wexham Springs. 42 p.
- [5] Schiessl P, Breit W, Raupach M. 1994, Durability of local repair measures on concrete structures damaged by reinforcement corrosion. Mathora, V.M- (editor). Durability of concrete. Detroit. American Concrete Institute. Pp. 1195-1215.
- [6] Richardson M. 1988, Carbonation of reinforced concrete. Dublin, CITIS. 203 p.
- [7] Broomfield J. 1997, Corrosion of steel in concrete – understanding, investigation and repair. London. E & FN Spon. 240 p.
- [8] Anon. 2002. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys r.y., Julkaisusarja by 42. 178 s.
- [9] Mattila J. 1995. Betonin uudelleen alkalointi sementtipohjaisilla tuotteilla. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. Lisensiaatintutkimus 161 s.
- [10] Kuosa Hannele, Vesikari Erkki 2000: Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus. Espoo, VTT tiedotteita 2056. 141 s.
- [11] Jokela A-M. 2008. Pesubetonijulkisivun vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. 76 s.
- [12] Weiho I. 2008. Betoniparvekkeiden pakkasenkestävyys olemassa olevissa rakenteissa. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. 172 s.
- [13] Varjonen S., Mattila J., Lahdensivu J., Pentti M. 2006, Conservation and Maintenance of Concrete Facades – Technical Possibilities and Restrictions. Tampere, Tampere University of Technology, Structural Engineering. Publication 136. 31 p.

# Raketerm-julkisivuelementin rakennusfysikaalinen toiminta

Kimmo Lähdesmäki ja Juha Vinha  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Tämä artikkeli on yhteenveto As Raken Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitokselta tilaamasta tutkimuksesta, jossa selvitettiin Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa laboratoriossa tehdyillä seinärakennekokeilla sekä laskennallisella mallinnuksella. Tutkituissa rakenteissa käytetty Raketerm-julkisivuelementti on tiililaattapintainen elementti, jonka taustan lämmöneristekerros muodostaa rakenteen ulkopintaan melko suuren vesihöyrynvastuksen ja joka siten aiheuttaa haasteen rakenteen rakennusfysikaaliselle toiminnalle. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Raketerm-elementillä verhotun ulkoseinärakenteen toimintaa Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Tutkimus osoitti, että Raketerm-julkisivuelementillä verhottu tuuletettu ulkoseinärakenne toimii kosteusteknisesti varmemmin kuin tuulettumaton ns. umpirakenne. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin, että myös tuulettumattomat rakenteet voivat kosteusteknisesti toimia riittävän hyvin, jos rakenteen sisäpinnassa on riittävän suuri vesihöyrynvastus, rakenteen alkukosteus (rakennekosteus) on riittävän pieni ja rakenteen yksityiskohdat (mm. liitoskohdat) on toteutettu huolellisesti. Tässä tutkimuksessa kehitettiin Raketerm-elementin taustapintaan liimattavaan EPS-eristeeseen kosteus- ja lämpötekniisesti optimaalinen tuuletusratkaisu. Tuuletuksen avulla rakenteesta poistuu riittävästi kosteutta, mutta tuulettuvan ilman liike on niin pientä, että Raketerm-elementissä olevaa lämmöneristettä voidaan hyödyntää suurelta osilta laskettaessa rakenteen U-arvoa. Tutkimuksessa kehitetty tuuletusratkaisu varmistaa kosteuden poiston rakenteesta ja se heikentää rakenteen U-arvoa ainoastaan  $0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

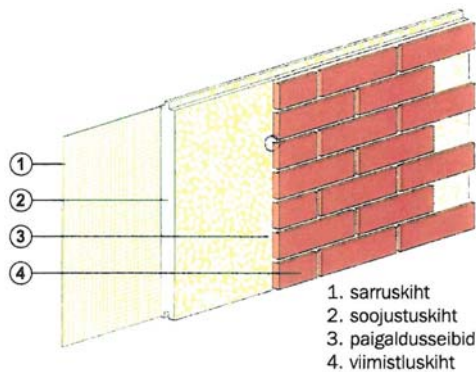
## 1. Johdanto

As Rake on kehittänyt ulkoseinien julkisivuverhouksiin tarkoitetun Raketerm-elementin. Raketerm-elementti toimii ulkoseinärakenteessa sekä julkisivun pintamateriaalina, että osittaisena lämmöneristeenä. Raketerm-elementti on tarkoitettu käytettäväksi sekä uudis- että korjausrakentamisessa niin pientaloissa, kerrostaloissa kuin julkisissakin rakennuksissa.[1]

Raketerm-elementti on ollut käytössä As Raken kotimaassa Virossa jo yli 10 vuotta ja elementille on myönnetty myös CE-merkintä. Raketerm-elementti on tarkoitus tuoda myös Suomen markkinoille. Suomen ilmasto-olosuhteet ovat ulkoseinän rakennusfysikaalista toimivuutta ajatellen kuitenkin vaativammat kuin Viron ilmasto-olosuhteet. Tämän johdosta Raketerm-elementin rakennusfysikaalista toimivuutta tutkittiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella. Tutkimus koostui laboratoriossa tehdyistä ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisista kokeista ja U-arvokokeista sekä laskennallisesta mallinnuksesta, joka käsitti Raketerm-elementin tuuletusratkaisun mallinnuksen ja erilaisten Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arvioinnin.[1]

## 2. Raketerm-julkisivuelementti

Raketerm-julkisivuelementti on pontattu tiililaattapintainen elementti, jonka taustana on polyuretaanin ja polystyreenin seoksesta tehty lämmöneristekerros. Lämmöneristekerros muodostaa melko suuren vesihöyrynvastuksen ( $\mu$ -arvo  $\sim 120$ ). Lämmöneristeen paksuus on 37 mm ja koko elementin paksuus käytetystä tiililaatasta riippuen joko 46 mm tai 53 mm. Julkisivuelementtiä valmistetaan  $1261 \times 570 \text{ mm}^2$  tai  $1313 \times 609 \text{ mm}^2$  kokoisina. Kuvassa 1 on esitetty Raketerm-julkisivuelementin rakenne ja kuvassa 2 on valokuva yhdestä julkisivuelementistä. [1]



Kuva 1. Raketerm-julkisivuelementti. Kuvassa numeroinnit tarkoittavat seuraavaa: 1. Vahvistekerros, 2. Lämmöneristekerros, 3. Asennusprikat, 4. Pinnoite. [1]



Kuva 2. Raketerm-julkisivuelementti. [1]

## 3. Ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaaliset kokeet ja laskennallinen mallinnus

Laboratoriossa tehtiin yhteensä yhdeksälle erilaiselle ulkoseinärakenteelle rakennusfysikaaliset kokeet. Rakenteet tutkittiin kolmessa eri koe-erässä, jokaisessa koe-erässä oli siten kolme erilaista rakennetta. Koe-erien jälkeen saatiin tietoa tutkituista rakenteista ja seuraavaan koe-erään tulevia rakenteita muutettiin, jos niissä havaittiin rakennusfysikaalisesti tarkasteltuna puutteita. Alkuperäisenä tarkoituksena oli tutkia ainoastaan umpirakenteita eli sellaisia rakenteita, joissa Raketerm-elementin ja varsinaisen seinärakenteen väliä ei tuuleteta lainkaan. Tällöin Raketerm-elementissä olevaa lämmöneristettä voitaisiin käyttää täysimääräisesti hyväksi laskettaessa seinärakenteen U-arvoa. [1]

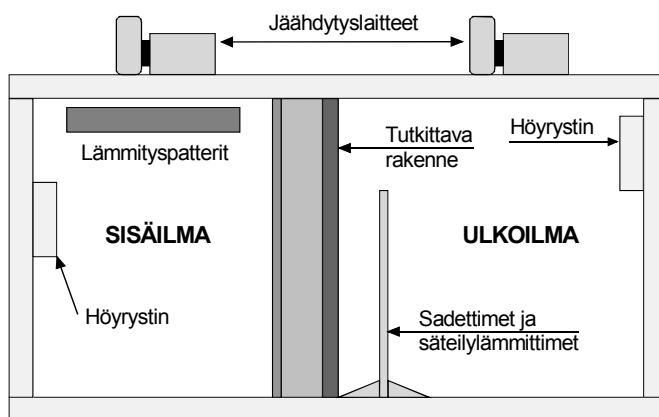


Seinä rakennekokeiden edetessä havaittiin kuitenkin, että kaikki rakenteet eivät toimineet umpirakenteina rakennusfysikaalisesti riittävän hyvin, jolloin kokeissa testattiin elementille erilaisia tuuletusratkaisuja [1]. Kosteus- ja lämpöteknisesti optimaalinen tuuletusratkaisu kehitettiin laskennallisen mallinnuksen avulla. Lähtötietoina mallinnuksessa käytettiin laboratoriokokeista saatuja tuloksia [1; 5]. Laboratoriossa tehdyillä U-arvokokeilla tarkasteltiin lisäksi kehitetyn tuuletusratkaisun vaikutusta rakenteen U-arvoon.

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli saada aikaan Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen ulkoseinä rakenteiden rakennekirjasto, jossa esitetään rakennusfysikaalisesti toimivat rakenteet. Tämän johdosta tehtiin rakennusfysikaalinen mallinnus yhteensä 107:lle erilaiselle Raketerm-julkisivuelementillä verhotulle ulkoseinä rakenteelle. Mallinnuksessa oli mukana sekä tuulettumattomia rakenteita, että tuulettuja rakenteita.

### 3.1 Ulkoseinä rakenteiden rakennusfysikaaliset laboratoriokokeet

Ulkoseinä rakenteiden rakennusfysikaaliset kokeet tehtiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen rakennushallissa olevalla säärasisustuslaitteistolla. Periaatekuva laitteistosta on esitetty kuvassa 3.



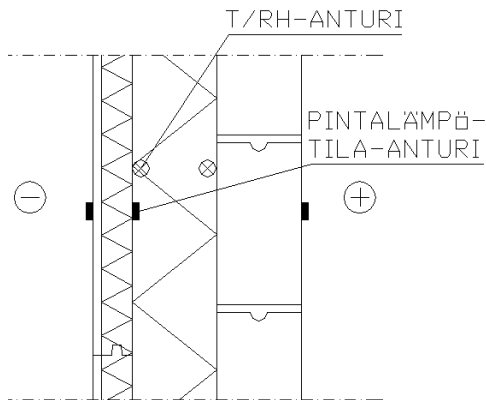
Kuva 3. Periaatteellinen kuva säärasisustuslaitteiston rakenteesta.

Ulkoseinä rakenteiden rakennusfysikaalisissa kokeissa oli tavoitteena saada tietoa rakenteiden toiminnasta suomalaisissa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa. Syysjakson tarkoituksena oli kertoa, miten ja kuinka nopeasti rakenteeseen kertyy kosteutta. Talvijaksolla tarkasteltiin pääasiassa mahdollisesti rakenteeseen kondensoituvaa kosteutta ja kevätjakson tarkoituksena oli antaa tietoa rakenteen kuivumiskyvystä. Jokainen koejakso kesti noin kaksi viikkoa ja siten yhden koe-erän kokeellinen tutkimus noin kuusi viikkoa. Taulukossa 1 on esitetty kokeiden tavoiteolosuhteet, jotka säärasisustuslaitteistoon säädettiin. Taulukossa 1 olevilla lämpötila- ja kosteusolosuhteilla säärasisustuslaitteiston sisäilmaan muodostui tavoiteltu noin  $4 \text{ g/m}^3$ :n kosteuslisä. Todelliset olosuhteet poikkesivat kokeen aikana eri koejaksoilla jonkin verran tavoiteolosuhteista.[1]

Taulukko 1. Laboratoriossa tehtyjen seinärakennekokeiden tavoiteolosuhteet.

Vuodenaika	Sisäpuoli		Ulkopuoli	
	T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]
Syksy	+20	62	+7	85
Talvi	+20	35	-10	90
Kevät	+20	46	+10...-6 (k.a. +2)	50...90 (k.a. 70)

Kaikki rakennusfysikaalisissa kokeissa tutkitut rakenteet on esitetty lähteessä [1]. Jokaisessa rakenteessa sisäpuolella oli 100 mm paksu kevytsoraharkkoseinä, jonka muuraus annettiin kuivua ennen koetta huolellisesti. Samaa harkkoseinää käytettiin jokaisessa koe-erässä. Harkkoseinän pintaan asennettiin lämmöneriste(et) sekä Raketerm-elementit. Osa tutkittavista rakenteista oli ns. umpirakenteita ja osassa Raketerm-elementin taustapinnan ja varsinaisen muun rakenteen väli oli osittain tai täysin tuuletettu. Lämmöneristeenä käytettiin rakenteesta riippuen EPS- eristeitä tai mineraalivillaa (kivivilla). Kuvassa 4 on esitetty yksi tutkittava rakenne.



Kuva 4. Yhden koerakenteen leikkauskuva. Kuvassa vasemmalta oikealle: Raketerm-elementti, EPS-eriste, kevytsoraharkko.

Koerakenteista mitattiin seuraavia suureita:

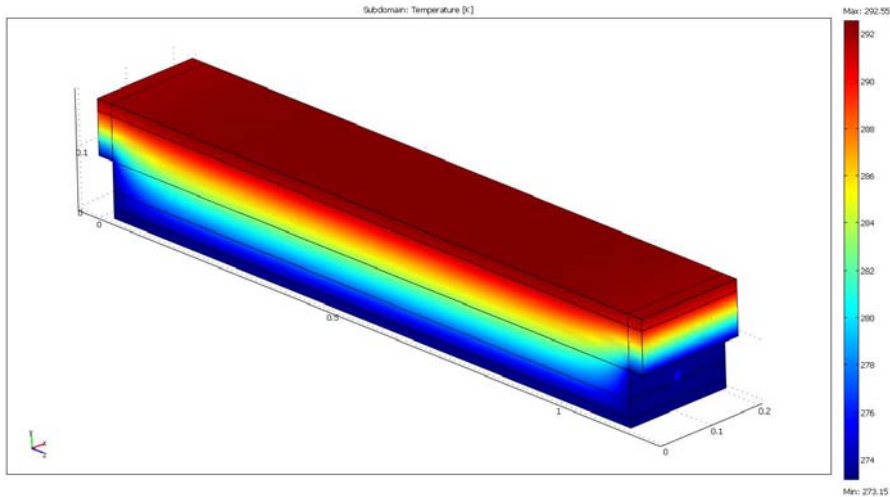
- lämpötila sisällä, ulkona, rakenteessa (materiaalien rajapinnoissa) ja pinnoilla rakenteen ylä- ja alaosasta (T) [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- ilman suhteellinen kosteus sisällä, ulkona ja rakenteen huokostilassa (materiaalien rajapinnoilla) rakenteen ylä- ja alaosasta (RH) [%]
- ilman virtausnopeus tuuletettujen rakenteiden tuuletusraoissa /-urissa rakenteen keskiosalta ( $r_a$ ) [m/s]
- lämpövirran tiheys koerakenteen läpi rakenteen keskeltä (q) [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

### 3.2 Ulkoseinärakenteen tuuletusratkaisun laskennallinen mallinnus ja kokeellinen U-arvo

Laskennallisella mallinnuksella tutkittiin Raketerm-julkisivuelementin taustan tuuletuksen vaikutusta rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Ennen laskennallista mallinnusta tuulettumattomalle rakenteelle tehtiin laboratoriossa U-arvokoe, josta saatiin lähtötietoja laskennalliseen mallinnukseen. Laskenta tehtiin Comsol Multiphysics -ohjelmistolla kaksivaiheisena. Ensimmäisessä vaiheessa rakenne mallinnettiin vastaamaan U-arvokokeen rakennetta (rakenteen korkeus 1185 mm) ja koetuloksia verrattiin numeerisen laskennan tuloksiin. Toisessa vaiheessa rakenteen toimintaa tarkasteltiin julkisivurakenteessa, jossa ilman virtausmatka tuuletuskanavassa vastasi lähempänä todellista tilannetta (seinän korkeus noin 3 metriä).

Laboratoriossa tehtyjen koetulosten perusteella ja tuotantotekniset reunaehdot huomioon ottaen laskennalliseen tarkasteluun valittiin ratkaisu, jossa elementin taustapintaan liimattuun EPS-eristeeseen tehtiin pystyuritus 200 mm:n jaolla. Urien poikkileikkauksena oli ympyrä, jonka halkaisija oli 17,5 mm.

U-arvokokeen simulaatio tehtiin rakenteeseen sekä luonnollisella, että pakotetulla konvektiolla. Lämpötilaerona rakenteen yli oli  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (sisällä  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ulkona  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Kuvassa 5 on esitetty laskentamallin lämpötilajakauma luonnollisen konvektion tapauksessa. U-arvokokeen mukaisesta rakenteesta mallinnettiin 3D-malli, jonka leveys oli 200 mm. Mallin keskellä oli 17,5 mm:n tuuletusura.



Kuva 5. Laskentamallin lämpötilajakauma luonnollisen konvektion tapauksessa.

Laskennallisen tarkastelun jälkeen valitun tuuletusratkaisun omaavalla rakenteella tehtiin laboratoriossa U-arvokoe, jonka avulla oli tarkoitus vielä arvioida laskennallisen tuloksen luotettavuutta. U-arvokokeet tehtiin TTY:n Rakennustekniikan hallissa olevalla rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla. Kuvassa 6 on esitetty yleiskuva laboratoriossa tehdystä U-arvokokeesta.



Kuva 6. Yleiskuva laboratoriossa tehdystä U-arvokokeesta.

### 3.3 Ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan laskennallinen mallinnus

Ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa mallinnettiin kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa mallinnettiin kaksi laboratoriossa aiemmin kokeellisesti tutkittua tuulettumatonta rakennetta ja toisessa osassa laskennallinen rakennusfysikaalinen mallinnus tehtiin yhteensä 70 erilaiselle Raketerm-julkisivuelementillä verhotulle tuulettumattomalle

ulkoseinäarakenteelle ja yhteensä 39 erilaiselle tuulettulle rakenteelle. Tilaaja määritteli laskennalliseen mallinnukseen tulevat rakenteet. Laskenta tehtiin Wufi 1D Pro 4.0 – ohjelmalla.[2; 3]

Ensimmäisen laskentavaiheen tarkoituksena oli arvioida laskennallisen mallin ja laboratoriokokeista saatujen tulosten yhtenäisyyttä. Laskennassa käytettiin laboratoriokokeesta saatua lämpötila- ja kosteusdataa ja materiaaliominaisuuksina Raketerm-elementin osalla tilaajalta ja muiden materiaalien osalta eri materiaalivalmistajilta saatuja tietoja.[2]

Laskennallisesta mallinnuksesta saadut tulokset vastasivat kohtuullisen hyvin laboratoriokokeiden tuloksia, jolloin rakenteiden toimintaa voitiin tarkastella samoilla materiaaliominaisuuksilla useamman vuoden kestäväillä tarkastelujaksolla riittävän luotettavasti.[2]

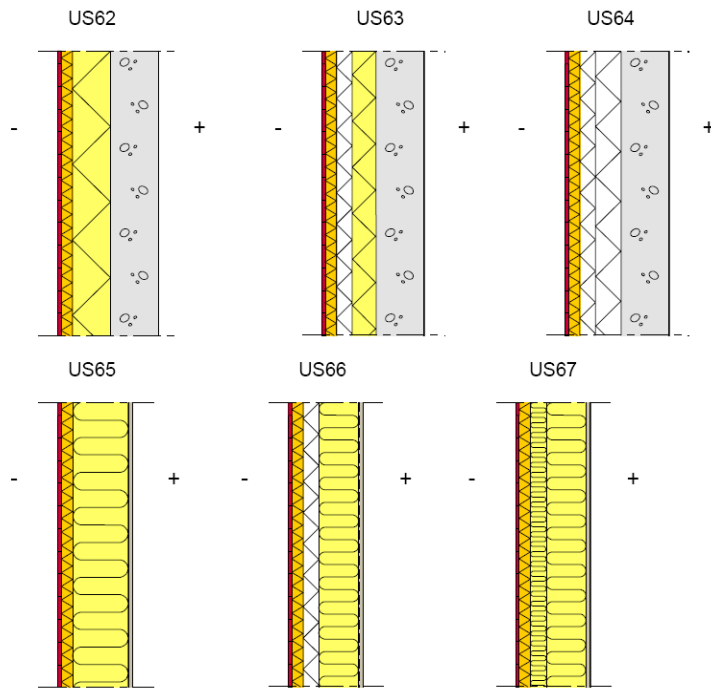
Laskennan toisessa vaiheessa tutkittaville rakenteille määritettiin kaksi toimivuuskriteeriä; kondensoitumisriski ja homehtumisriski. Laskennallinen mallinnus rakenteille tehtiin kahdella laskentaohjelmasta saatavalla ilmastodatalla. Espoon ilmastodatan avulla tarkasteltiin seinäarakenteiden homehtumisriskiä ja Karasjoen (Pohjois-Norja) ilmastodatalla seinäarakenteiden kondensoitumisriskiä. Kondensoitumisriskiä arvioitiin neljän vuoden ajanjaksolla. Rakenteen ulko-osiin sallittiin kondensoituvan kosteutta kriittisimmällä tarkastelujaksolla lyhytaikaisesti, mutta rakenteen tuli olla kuivumisjaksoilla kuivuva. Pidempiaikaista kosteuden kondensoitumista tai kosteuden kerääntymistä (kumuloitumista) rakenteeseen ei sallittu. [2; 3]

Homehtumistarkastelu tehtiin seinäarakenteista kahden vuoden ajanjaksolla (sama säädata käytettiin kahtena vuotena peräkkäin) ja homeenkasvun riskiä arvioitiin laskennallisen homemallin avulla [6]. Homeenkasvun kannalta raja-arvoksi määritettiin homeindeksitaso 1 myös rakenteiden ulko-osissa [2; 3].

Sisäilman kosteuslisänä käytettiin EN ISO 13788 –standardin mukaista kosteuslisää, joka riippuu ulkoilman lämpötilasta. Ulkoilman lämpötilan ollessa alle 0 °C, kosteuslisä on 6 g/m<sup>3</sup>. Kosteuslisä on 0 g/m<sup>3</sup>, kun ulkolämpötila on yli 20 °C. Lämpötila-alueella 0...20 °C, sisäilman kosteuslisä muuttuu lineaarisesti välillä 6...0 g/m<sup>3</sup>. Laskennassa materiaalien alkulämpötilana käytettiin 20 °C ja materiaalien alkukosteutta vastaavana huokosilman suhteellisena kosteutena 65 % RH. [2; 3]

Kaikissa tuulettuissa rakenteissa julkisivuna käytettiin aiemmin laskennallisen mallinnuksen tuloksena saatua tuuletusuritetua Raketerm-elementtiä (ks. kohta 3.2). Tässä tutkimuksen osassa tuuletusuritetun Raketerm-elementin urituksen ulkopuolella olevat ”osat” jätettiin mallinnuksesta pois, koska elementin taustapintaan kerääntyvä kosteus poistuu rakenteesta tuuletusurien kautta. Poistetut osat korvattiin lämpötekniisesti laskennallisessa mallinnuksessa suuremmalla rakenteen ulkopinnan pintavastuksella.

Kuvassa 7 on esitetty muutama yksittäinen tuulettumaton rakenne, jolle laskennallinen rakennusfysiikallinen mallinnus tehtiin.



Kuva 7. Muutamia laskennallisella mallinnuksella tutkittuja rakenteita.

## 4. Tulokset

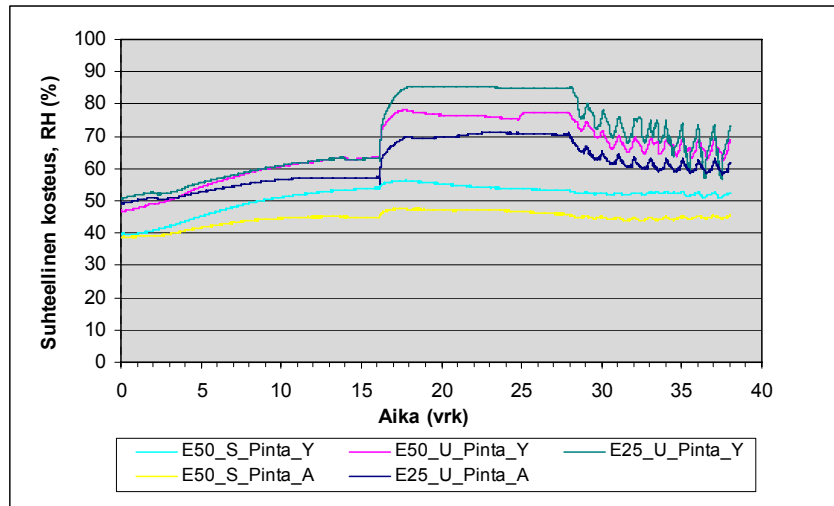
### 4.1 Ulkoseinärakenteiden laboratoriokoeket

Ensimmäisessä koe-erässä (seinärakenteet 1A-1C) sisäpuolen harkkoseinä oli pinnoittamaton (ei tasoitetta/ rappausta tms.) ja rakenteina tutkittiin kahta umpirakennetta (mineraalivillaeristeinen seinärakenne 1A ja EPS-eristeinen seinärakenne 1B) ja yhtä tuuletettua rakennetta (seinärakenne 1C). Seinärakenteessa 1C Raketerm-elementin taustan tuuletus hoidettiin yhtenäisellä 10 mm leveällä tuuletusraolla. Ensimmäisen koe-erän umpirakenteet eivät toimineet kosteusteknisesti riittävän hyvin, koska Raketerm-elementin taustapintaan tiivistyi liikaa kosteutta. Suhteellisen kosteuden nousu aiheutui rakenteen sisäpuolelta (sisäilmasta) diffuusiolla siirtyvästä kosteudesta. Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus oli selvästi liian alhainen (pinnoittamaton harkkoseinä, jota oikeissa rakenteissa ei yleensä edes käytetä). Seinärakenne 1C ei toiminut lämpötekniisesti halutulla tavalla, koska tuuletusraon lämpötila seurasi ulkoilman lämpötilaa. Tällöin tuuletusraon ulkopuolella olevaa Raketerm-elementin lämmöneristettä ei voida laskea mukaan rakenteen U-arvoon.[1]

Toisen koe-erän rakenteisiin lisättiin harkon sisäpintaan vesihöyrynvastusta. Harkon pinnassa normaalisti käytettävän tasoite- tai rappauskerroksen tilalla koerakenteissa käytettiin ilmansulkukalvoa, jonka vesihöyrynvastuksen arvo oli tiedossa. Ilmansulkukalvon vesihöyrynvastus valittiin siten, että se vastasi paksumman kevytsoraharkon ja tasoite-/rappauskerroksen yhteistä vesihöyrynvastusta. Tasoite-/rappauskerrosta ei koerakenteissa käytetty, koska rakenteeseen ei haluttu tuoda kosteutta, jonka määrää ei olisi tarkasti pystytty myöhemmin tehtäviä laskennallisia tarkasteluja varten määrittämään.[1]

Toisessa koe-erässä tutkittiin yhtä umpirakennetta (seinärakenne 2A) ja kahta tuuletettua ratkaisua (seinärakenteet 2B ja 2C). Seinärakenteessa 2B rakenteen tuuletus hoidettiin Raketerm-elementin taustapintaan erikseen liimattuun EPS-eristeeseen jyrskytyjen tuuletuskanavien avulla.

Seinärakenteessa 2C tuuletus toteutettiin mineraalivillaeristeen päälle rakennetun puurimoituksen avulla. Toisen koe-erän kaikki seinärakenteet toimivat kosteusteknisesti hyvin. Suhteelliset kosteudet pysyivät koko kokeen ajan riittävän alhaisella tasolla sekä syksy- että talvijaksolla. Kuvassa 8 on esitetty seinärakenteen 2A suhteelliset kosteudet rakenteen ylä- ja alaosaan. Kuvajasssa olevat selitteet tarkoittavat rakenteessa olleita eri mittauskohtia. Kuvasta nähdään suhteellisen kosteuden tasot kokeen aikana. Seinän yläosassa suhteelliset kosteudet olivat jonkin verran korkeammalla tasolla kuin seinän alaosaan. [1]



Kuva 8. Seinärakenteen 2A suhteelliset kosteudet kokeen aikana seinän ylä- ja alaosaan mitattuna. [1]

Toisen koe-erän tuuletettuja seinärakenteita ei voitu pitää riittävän hyvinä tuuletuksen lämpötekniiseltä kannalta tarkasteltuna. Tuuletukskanavissa/ -rimoituksen ilmatilassa lämpötilat olivat melko lähellä ulkoilman lämpötiloja, jolloin elementin lämmöneriste ei muodostanut rakenteeseen lämmönvastusta. [1]

Koe-erässä 3 tutkittiin kahta tuuletettua ratkaisua ja yhtä umpirakennetta. Tuuletuksvaihtoehtoina oli yhtenäinen tuuletusrako ja koe-erän 2 tavoin EPS-eristeeseen jyrskityt tuuletusurat. Tuuletusurien leveydet olivat pienempiä verrattuna koe-erän 2 tuuletusuriin. Koe-erän 3 rakenteet toimivat kokeessa kosteusteknisesti hyvin tai melko hyvin. Tuuletusurallinen ratkaisu toimi myös lämpötekniisesti paremmin kuin koe-erän 2 rakenne leveämmällä tuuletusuralla. Tässä tapauksessa Raketerm-julkisivuelementin lämmöneristeen hyödyntäminen U-arvoa laskettaessa on osittain mahdollista. Näistä kokeista saatiin lähtötietoja laskennalliseen mallinnukseen kosteus- ja lämpötekniisesti optimaalisen tuuletusratkaisun löytämiseksi. [1]

#### 4.2 Ulkoseinärakenteen tuuletuksen laskennallinen mallinnus ja kokeellinen U-arvo

Laskennan tuloksena tuuletusurien vaikutus rakenteen lämmöneristävytyteen oli vähäinen. Tuuletukskanavista aiheutuva lisäys rakenteen U-arvoon oli  $0,0043 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kosteustekniisessä tarkastelussa tuuletukskanavien mukana rakenteesta poistuva kosteus määrä luonnollisen konvektion vaikutuksesta on suurempi kuin diffuusiolla sisältä päin kulkeutuvan kosteuden määrä, jolloin julkisivuelementin taakse ei laskelman mukaan synny kondenssivaaraa. [5] Laboratoriokokeessa tuuletusratkaisun havainnoitiin heikentävän rakenteen U-arvoa jonkin verran enemmän kuin laskennallisesti, tuloksen ollessa  $0,007 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Laboratoriossa havaittiin kuitenkin ilman virtausnopeuden olevan tuuletusurissa selvästi suurempi, kun ns. normaalitilanteessa. Laboratoriossa tehdyt U-arvokokeiden tulokset vahvistivat kuitenkin sen,

että laskennallisella tarkastelulla saatu U-arvon lisäys on oikealla tasolla. Yhteenvedona voidaan todeta, että suunnittelussa tuuletusurituksen aiheuttamana U-arvon lisäyksenä voidaan käyttää arvoa  $\Delta U = 0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [4]

### 4.3 Ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan laskennallinen mallinnus

Tuulettumattomissa rakenteissa rakenteen homehtumisriskin kannalta kriittisemmäksi kohdaksi muodostui yleisemmin Raketerm-elementtiin liimatun EPS-eristeen sisäpinta [2].

Homehtumiskriteerinä pidettyä homeindeksitasoa 1 voidaan pitää tiukkana rajana, kun arvioidaan lähellä rakenteen ulkopintaa olevaa aluetta. Kondensoitumisen kannalta kriittisin kohta useissa rakenteissa oli Raketerm-elementin polyuretaani-polystyreeni-lämmöneristeyhdistelmän sisäpinta. Kondensoitumiskriteeriä ei tutkimuksessa pidetty erityisen tiukkana, koska rakenteen ulko-osiin sallittiin tarkastelujaksoilla lievää kondensoitumista. Kondensoitumisriskin kannalta laskenta oli ns. normaalin tilanteeseen nähden kuitenkin varmalla puolella, koska tarkastelussa käytettiin korkeaa sisäilman kosteuslisää ( $6 \text{ g/m}^3$ ) ja laskennallinen tarkastelu tehtiin kondensoitumisen kannalta hyvin kriittisessä kylmässä ilmastossa (Pohjois-Norjan ilmasto) [2]. Näillä reunaehdoilla rakenteen laskennalliseen tarkasteluun haettiin varmuutta. Laskennan perusteella hyväksytyt rakenteet toimivat tällöin luotettavasti myös Suomessa ajoittain esiintyvien rankempien ilmasto-olosuhteidenkin aikana.

Laskennallisen mallinnuksen tuloksena rakennusfysikaalisesti toimivista rakenteista tehtiin rakennekirjasto [2; 3].

## 5. Yhteenveto

Raketerm-elementillä verhottujen ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan tutkiminen koostui sekä laboratoriossa tehdyistä kokeista, että laskennallisesta tarkastelusta. Lähtökohdana tutkimukselle oli selvittää Raketerm-elementillä verhotun ulkoseinärakenteen toimintaa Suomen ilmasto-olosuhteissa. Raketerm-elementin lämmöneristekerros muodostuu polyuretaanin ja polystyreenin sekoitteesta, jolloin elementin lämmöneristekerros muodostaa rakenteen ulko-osiin melko suuren vesihöyrynvastuksen. Tämä vaikuttaa koko rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Rakenteita tutkittiin sekä ns. umpirakenteina, että tuulettuvina rakenteina.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että seinärakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan edellytyksenä on se, että rakenteen sisäpuolinen vesihöyrynvastus on riittävän suuri. Tämä edellytys on voimassa yleisestikin ulkoseinärakenteissa [7]. Kokeiden perusteella tuulettut rakenteet toimivat kosteusteknisesti paremmin kuin umpirakenteet. Umpirakenteet voivat tutkimuksen mukaan toimia kosteusteknisesti tietyillä reunaehdoilla myös riittävän hyvin. Tällöin tulee kiinnittää erityistä huomiota rakenteen sisäpinnan riittävän vesihöyrynvastuksen lisäksi siihen, että rakenteen alkukosteus (rakennekosteus) on riittävän pieni ja että rakenteen yksityiskohdat (mm. liitoskohdat) on toteutettu huolella, jotta rakenteeseen ei pääse käytön aikaista ylimääräistä kosteutta.

Käytettäessä rakenteessa ns. perinteistä yhtenäistä tuuletusrakoa, Raketerm-elementin lämmöneristekerrosta ei voida hyödyntää laskettaessa rakenteen U-arvoa. Tutkimuksessa kehitettiin optimaalinen tuuletusratkaisu, joka vie rakenteesta kosteutta riittävästi pois, mutta tuuletusratkaisu on samalla sellainen, että Raketerm-elementin taustapinnan polyuretaani/ -

polystyreeni-lämmöneristekerrosta voidaan suurelta osin hyödyntää laskettaessa rakenteen U-arvoa. Laskennallisen mallinnuksen avulla päädyttiin ratkaisuun, jossa Raketerm-elementin taustapintaan liimattuun 25 mm:n paksuiseen EPS-eristeeseen tehdään tuuletuskanavisto ( $\text{Ø}17,5$  mm, k200). Laskelmien mukaan kosteutta poistuu kanaviston avulla rakenteesta riittävästi, mutta tuuletus heikentää Raketerm-elementin lämmönvastusta ainoastaan  $0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Rakenteiden rakennusfysikaalisen mallinnuksen avulla määritettiin yhteensä 109 erilaisen rakenteen rakennusfysikaalinen toiminta. Tarkastelujen perusteella tehtiin rakennekirjasto toimivista Raketerm-julkisivuelementillä verhotuista ulkoseinärakenteista.

## Lähdeluettelo

- [1] Lähdesmäki, K. 2009. Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 100 s. + 16 liites.
- [2] Vinha, J. & Lähdesmäki, K. 2006. Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden laskennallinen mallinnus. Tutkimusselostus N:o 1528. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikka. 24 s. + 40 liites.
- [3] Vinha, J. & Lähdesmäki, K. 2007. Uritettujen Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden laskennallinen mallinnus. Tutkimusselostus N:o 1557. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikka. 14 s. + 27 liites.
- [4] Vinha, J. & Lähdesmäki, K. 2007. Raketerm-julkisivuelementillä verhotun seinärakenteen U-arvokoe. Tutkimusselostus N:o 1558. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikka. 14 s. + 4 liites.
- [5] Hietala, J. 2007. Raketerm-julkisivuelementin taustan tuuletuksen laskennallinen tarkastelu. Tutkimusselostus N:o 1574. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. 15 s. + 5 liites.
- [6] Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown decay in wooden material and wooden structures, Effect of humidity, temperature and exposure time. Ph.D. thesis. Uppsala, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. 58 p. + appendices.
- [7] 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. Doctoral Thesis. Tampere. Tampere University of Technology, Publication 658. 338 p. + app. 10 p.



# Puurakenteinen TES-järjestelmä julkisivujen korjausratkaisuna

Erno Huttunen ja Markus Derry  
Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka

## Tiivistelmä

TES Energy Facade - projektissa tutkittiin rakennusten energiatehokkuutta parantavaa korjausmenetelmää puurunkoisella, lisälämmöneristävällä elementtijärjestelmällä. TES-menetelmän tavoitteeksi Suomessa valittiin rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen VTT:n ehdottamaan passiivitalotasoon asti. Tavoitteen saavuttaminen pelkällä julkisivun eristämällä vaatii 200 mm - 400 mm lisälämmöneristystä, alkuperäisestä rakenteesta riippuen. Tutkimuksen yhteydessä tutkittiin TES-elementtiä rakennusfysikaalisilla kokeilla ja laskelmin. Kokeissa todettiin elementin hyvä lämpö- ja kosteustekninen toimivuus sekä 2-ulotteisen analyttisen simuloinnin riittävä tarkkuus. Toisaalta tarkastelut osoittivat myös kohdekohtaisen kosteussuunnittelun tarpeelliseksi.

## 1. Johdanto

TES Energy Facade Timberbased element systems for improving the energy efficiency of the building envelope, on kansainvälinen Wood Wisdom-Net projekti. Projektissa pyritään kehittämään puurunkoista, esivalmistettuihin julkisivuelementteihin perustuvaa korjausmenetelmää, jolla voidaan parantaa olevan rakennuksen energiatehokkuutta. Projektin kehittämän menetelmän kohteena ovat 1950 – 1980 luvun rakennukset.

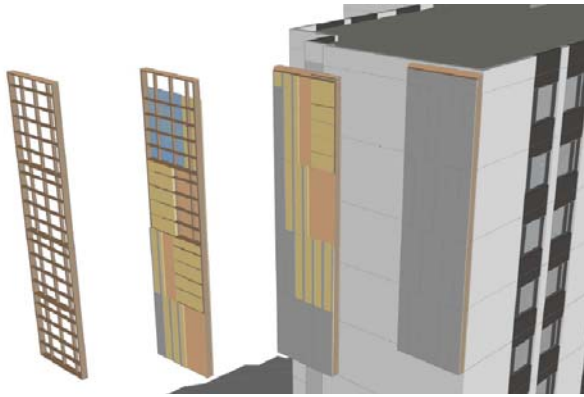
TES-korjauksen etuna on mahdollisimman korkea esivalmistusaste, mikä yhdessä myös mahdollisen LVI-tekniikan julkisivuihin sijoittamisen kanssa nostaisi järjestelmän kilpailukykyä. LVI-laitteiden ja kanavien julkisivuelementteihin on tavoitteena mahdollisissa tulevilla hankkeissa. Järjestelmän eräänä tutkittuna mahdollisuutena on telineetön asennus työmaalla, jolloin rakentaminen on edullisempaa ja nopeampaa.

Tässä artikkelissa tarkastellaan järjestelmän rakennusfysikaalista toimivuutta ja ratkaisuja rakennusfysikaalisten kokeiden perusteella.

## 2. TES-järjestelmä

TES-järjestelmässä vanha rakennuksen vaipan ulkoseinät päällystetään puurunkoisilla esivalmistetuilla suurelementeillä (kuva 1). Vanhasta rakennuksesta voidaan tarvittaessa poistaa alkuperäisen seinärakenteen ulkokuori ja vanha eristekerros, mikäli niiden kunto on huono. Jos koko vaipan seinärakenne on huonossa kunnossa ja ilmaa vuotava, voidaan koko seinärakenne korvata TES-järjestelmällä, jolloin seinärakenteen sisäpintakin tulee elementtien mukana.

TES-järjestelmän eristemateriaali voidaan valita kohteen mukaisesti. Korkeissa rakennuksissa, yli neljä kerroksisissa, tulee käyttää palamattomia eristeitä kuten mineraalivillaa. Matalissa rakennuksissa, joissa palomääräykset eivät vaadi palamattomia eristeitä, voidaan käyttää myös puupohjaisia eristeitä. Puupohjaisia eristeitä käyttämällä voidaan parantaa korjausmenetelmän ympäristöystävällisyyttä.



Kuva 1. TES-järjestelmän periaatekuva.

Järjestelmä mahdollistaa sekä vaaka- että pystysuuntaiset elementit. Elementit voidaan kannattaa omalla perustuksella, kantavasta rungosta kiinnittämällä tai katosta riipustamalla. Ensimmäisessä tapauksessa perustuksia yleensä joudutaan leventämään sopivaksi lisäelementille. Välipohjaan kiinnitettäessä täytyy varmistua välipohjan kantavuudesta kiinnityksen osalta.

Passiivitalotasoinen energiatehokkuus vaatii rakennukselta erittäin hyvää ilmanpitävyyttä: ilmanvuotoluku  $n_{50}$  täytyy olla alle 0,6 1/h. Suunnittelussa tulee kiinnittää erityistä huomiota ilmatiivyyteen, varsinkin jos alkuperäinen seinärakenne ei ole tiivis.

### 3. Rakennusfysikaalinen toimivuus

#### 3.1 Yleistä

TES-järjestelmän rakennusfysikaalinen tarkoitus on lisätä vaipan seinärakenteen lämmönvastusta. Passiivitalovaatimus tarkoittaa seinän U-arvojen parantamista tasolle 0,1 – 0,15 W/m<sup>2</sup>K riippuen rakennuksen ympäristöolosuhteista ja käytettävästä talotekniikasta. VTT:n ehdottama passiivitalovaatimus koskee rakennuksen lämmitysenergian tarvetta. Sen täytyy olla Suomessa 20 – 30 kWh/asuin-m<sup>2</sup> h [1]. Seinien U-arvovaatimukset määräytyvät rakennuskohtaisesta lämmitysenergiatarve tarkastelusta. Suurin vaikutus lämmitysenergian tarpeeseen on rakennuksen ilmanvaihdolla ja ilman lämmöntalteenotolla. Alkuperäisestä rakenteesta riippuen lisättävän lämmöneristekerroksen paksuus tulee olla noin 200 mm – 400 mm.

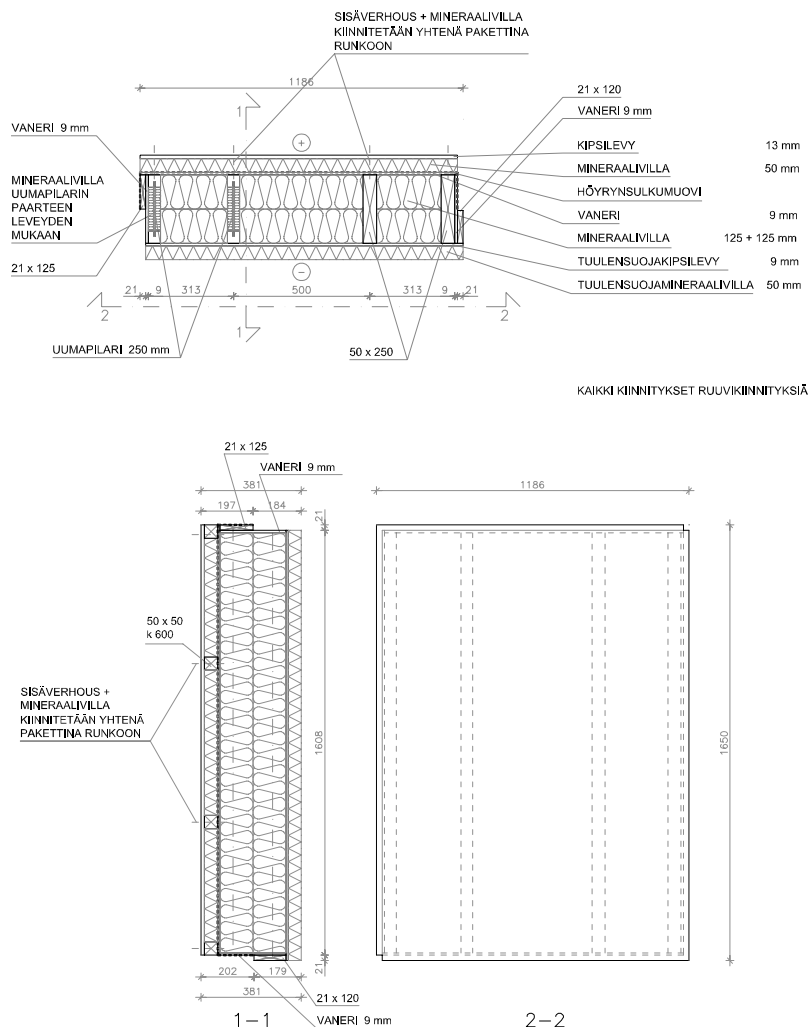
Paksujen lämmöneristekerrosten yhteydessä on huomioitava eristeiden sisäinen konvektio. Sisäisen konvektion on todettu vaikuttavan merkittävästi lämmöneristeen normaaliseen lämmönjohtavuuteen  $\lambda_n$ , kun eristekerroksen paksuus suurenee noin 250 mm suuremmaksi. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa  $\lambda_{design}$  käytettäessä lämmönvastuksen laskenta on jo epävarmalla puolella, kun eristekerroksen paksuus ylittää 100 mm. [2]

Sisäistä konvektiota voidaan estää asentamalla eristekerrosten väliin ilmansulkukerroksia, esim. rakennuspaperia. Ilmiö voidaan myös ottaa huomioon heikentämällä eristekerroksen laskennallista lämmönjohtavuutta.

#### 3.2 Testiseinän rakennus fysikaaliset koestukset

Projektin yhteydessä tutkittiin TES-elementin rakennusfysikaalista toimivuutta. Kokeellisissa tutkimuksissa testattiin kahta eri elementtiä erilaisilla runkovaihtoehdoilla: uuma- ja sahatavarapilarirunkoisella elementillä (elementti 1, kuva 2) ja ristirunkoisella elementillä.

Molempien elementtien lämmönvastoja tutkittiin lämpövirtakokein. Lisäksi pilarirunkoista elementtiä tutkittiin lämpö- ja kosteusteknisin kokein epästationäärisillä reunaehdoilla. Tässä artikkelissa esitellään pilarirunkoelementin tuloksia.



Kuva 2. Pilarirunkoisen koestuselementin piirustukset.

### 3.2.1 Analyttinen mallinnus

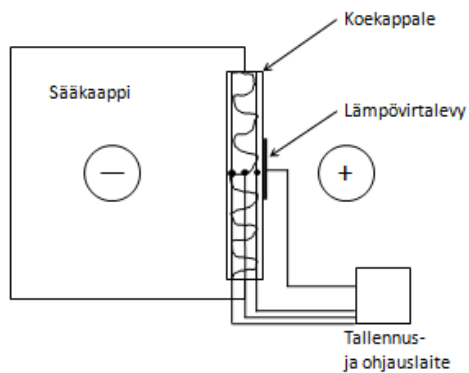
Rakenteita mallinnettiin ja tarkasteltiin numeerisesti Comsol Multiphysics ohjelmalla, joka on elementtimenetelmään perustuva yleinen osittaisdifferentiaaliyhtälöihin perustuvien ilmiöiden laskentaohjelma. Tutkimuksessa käytettiin 2-ulotteista simulointia, joka perustui yleiseen lämmönjohtavuusyhtälöön ja kosteustekniikassa tuttuun diffuusioyhtälöön. Mallinnuksessa materiaaliominaisuuksina käytettiin taulukon 1 mukaisia arvoja.

### 3.2.2 Lämpövirtakokeen koejärjestely

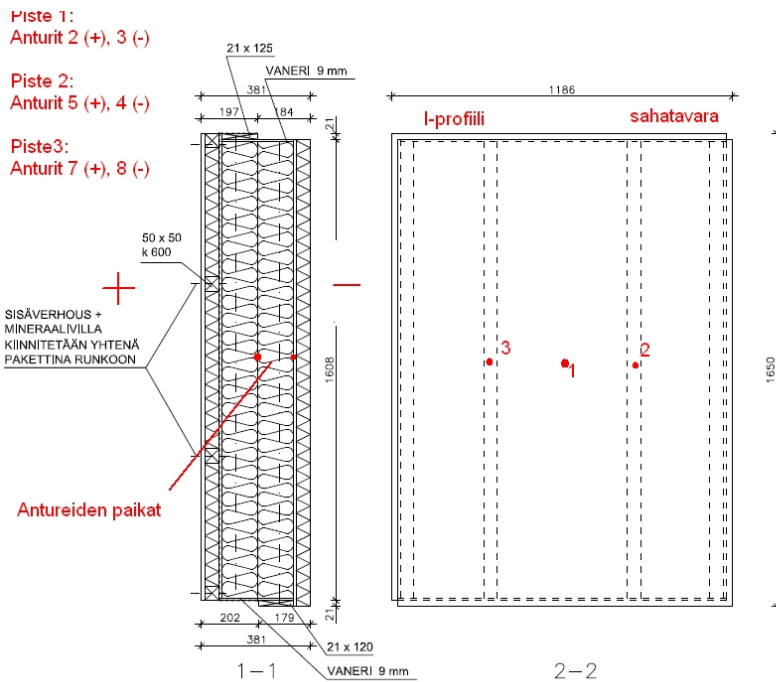
Koestuselementeille suoritettiin Arctest sääkaapin avulla lämpövirtakoe (kokeen periaatepiirustus on esitetty kuvassa 3). Kokeen aikana mitattiin elementin läpi kulkeva lämpövirta lämpövirtalevyn avulla. Rakenteen sisään asennettiin Vaisala HMP44L mittausantureita, joilla voidaan mitata mittauspisteen lämpötila sekä ilman suhteellinen kosteus. Myös sääkaapin sisään sekä lämpimään huonetilaan asennettiin vastaavat Vaisalan anturit. Ennen kokeen alkua mittausanturit kalibroitiin suolaliuosten avulla koetulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Mittaustulokset tallennettiin dataloggereihin. Mittausväli oli lämpövirtakokeessa 5 minuuttia.

Taulukko 1. Analyttisessä mallinnuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus $\lambda_d$ (W/mK)	Kosteuden läpäisevyys $d_v$ (1/s $10^{-9}$ )	Vesihöyryn diffuusivastus r (GNs/kgm)	Vesihöyryn diffuusivastus kerroin $\mu$
Kipsilevy	0,23	3395,6	38,5	7,7
Mineraalivilla	0,037	26120,0	5	1
Muovi	0,05	0,26	500000	100000
Puu	0,12	261,2	500	100
Puu, I-profiilin uumassa	0,23	261,2	500	100
Polyuretaani	0,03	4,35	30000	6000
Polyeteenikalvo	0,05	0,05	2500000	500000
Isover RKL	0,031	11105,4	11,8	2,4
Kevytsorabetoni	0,024	13060,0	10	2



Kuva 3. Koejärjestelmän periaate kuva.



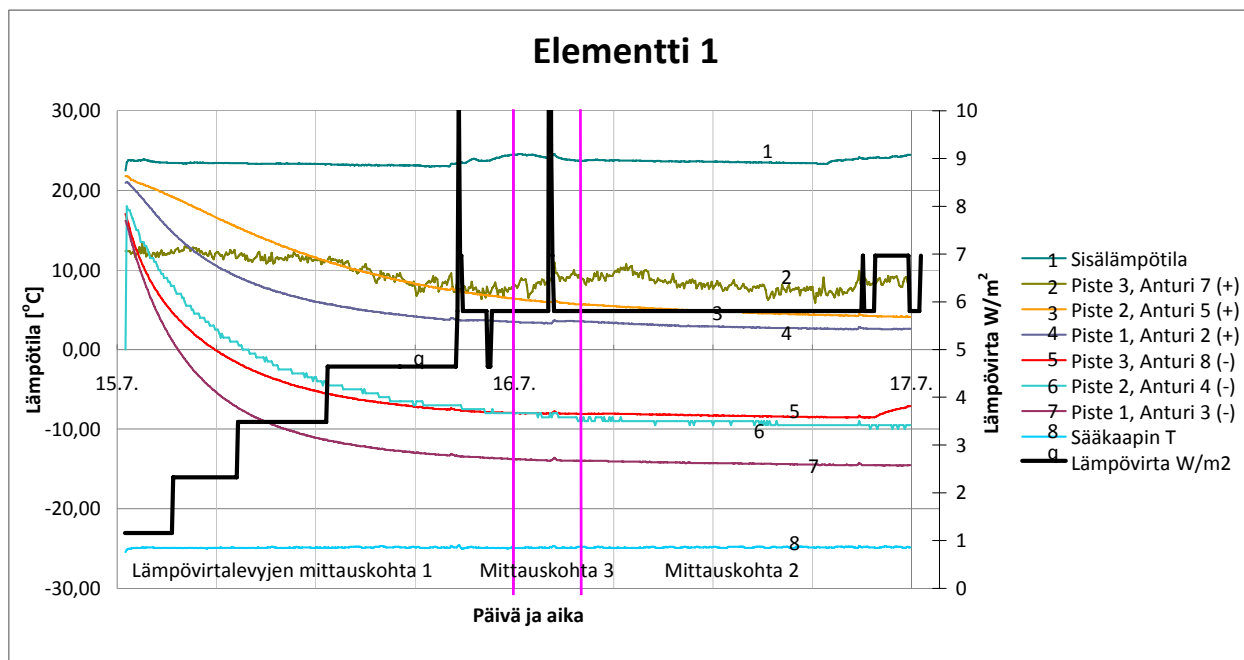
Kuva 4. Pilarirunkoelementin mittauspisteiden paikat.

Lämpövirtakokeen aikana sääkaapin tavoite sisälämpötila oli noin  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Huoneilman lämpötilaa ei pystytty säätämään, joten huoneilman keskilämpötilaksi mitattiin noin  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koestuselementeistä mitattiin elementin läpäisevä lämpövirta lämpövirtalevyn avulla kolmesta pisteestä. Lämpövirrat mitattiin pilarielementin osalta kuvan 4 mittauspisteistä 1, 2 ja 3.

Mittauksia jatkettiin, kunnes lämpövirrat olivat tasaantuneita. Mittausajat vaihtelivat 6 tunnista 22 tuntiin.

### 3.2.3 Lämpövirtakokeen tulokset

Lämpövirtakokeen mittaustulokset ovat näkyvissä kuvassa 5. Tuloksista nähdään lämpövirtalevyn suuri epätarkkuus, joten kokeen tuloksia ei voida arvioida tarkasti. Lämpövirtalevyn epätarkkuus näkyy kuvan 5 lämpövirtakuvaajan porrasmuodossa. Lämpövirta ei kuitenkaan ole muuttunut porrasmuodosta. Mittaustulosten porrasmuodosta johtuu erittäin pienistä lämpövirroista, jolloin mittalaitteilla ei ole kykyä reagoida pienempiin muutoksiin.



Kuva 5. Pilarielementin lämpövirtakokeen koetulokset.

Taulukoon 2 on koottu yhteenveto lämpövirta kokeen tuloksista lämpövirtoina ja  $U$ -arvoina. Taulukoihin on lisäksi laskettu analyttisen ja mittaustuloksien väliset erot.

Taulukko 2. Pilarirunkoelementin analyttiset ja mitatut lämpövirrat ja  $U$ -arvot.

Mittauspiste	Analyttinen tulos $q$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Mittaustulos $q$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Erotus $\Delta q$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Analyttinen tulos $U$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	Mittaustulos $U$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	Erotus $\Delta U$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
1	4,948	4,644	0,304	0,103	0,096	0,0065
2	5,528	5,805	-0,277	0,115	0,120	-0,0047
3	5,342	5,805	-0,463	0,111	0,118	-0,0074

Taulukosta 2 nähdään pilarirunkoelementin tapauksessa analyttisen tuloksen hyvä vastaavuus mittaustuloksiin nähden. Tästä voidaan päätellä, että analyttisessä mallinnuksessa käytetyt lämmönjohtavuudet ovat vastanneet hyvin kokeessa käytetyn elementin koetilanteen lämmönjohtavuuksia. Niin ollen rakenne toimii tältä osin, kuten analyttisesti on mallinnettu.

Ristirunkoelementin tapauksessa eri pisteiden mittaustulokset olivat samat, ja vastasivat pilarirungon pisteen 1 mittaustuloksia. Mittalaitteiden epätarkkuuksien takia eroja eri pisteiden (keskeltä mineraalivillaa, vaakarungon kohdalta ja runkojen risteyskohdalta) ei pystytty todentamaan. Kyseisessä tapauksessa mittalaitteiden epätarkkuus johtuu mittauksissa käytetyn lämpövirran levyn mittausalueesta. Lämpövirtalevyn mittausalue on suorakaiteen muotoinen ja paljon suurempi kuin puurunkojen ristikohta. Pistemäisellä mittausalueella olisi voinut päästä tarkempiin arvoihin.

### 3.2.4 Epästationaarisen kosteuskokeen koejärjestely

Pilarirunkoelementin epästationaarisessa kosteuskokeessa elementin sisäpuolelle rakennettiin Maxitin Lecaterm-harkoista sisäkuori (300 mm paksu) vastaamaan vanhaa purkamaton rakennetta, jonka päälle TES elementti asennetaan (kuva 6). Harkossa oli noin 100 mm polyuretaanieristettä ja sen molemmin puolin 100 mm kevytsorabetonia. Koska harkkoseinä jouduttiin purkamaan kokeen jälkeen, harkkoja ei muurattu laastilla yhteen.



Kuva 6. Epästationaarisen kosteuskokeen koejärjestely: Lecaterm-harkkoseinä rakenteilla elementin lämpimälle puolelle (vasen) ja lopullinen koejärjestely (oikea).

Sääkaapin avulla kuvattiin Sodankylässä vallitsevia syksy ja talviolosuhteita. Kokeessa käytettiin lämpötilajaksoja, jotka vastasivat syys-, loka-, marras- ja tammikuun keskimääräisiä lämpötiloja (vuodet 1961-1990) [3]. Kukin jakso kesti 82,5 tuntia ja siirtyminen seuraavaan lämpötilajaksoon tapahtui 2 tunnin aikana. Sääkaapin tekniikan vuoksi suhteellista kosteutta sääkaapin sisällä ei voida säätää lämpötilan ollessa alle +20 °C, joten kosteuskokeessa ei voitu säädellä sääkaapin ilman suhteellista kosteutta. Taulukossa 3 on esitetty lämpötilajaksojen tarkemmat tiedot.

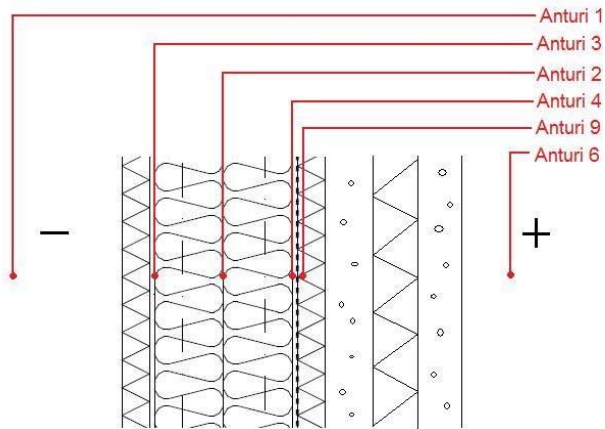
Taulukko 3. Kosteuskokeen lämpötilajaksot.

Jakson numero	Lämpötila [°C]	Kuukausi
1	5,9	syyskuu
2	-0,2	lokakuu
3	-7,4	marraskuu
4	-15,1	tammikuu

Kosteuskokeen kokonaiskesto oli 5 viikkoa. Lämpötilajaksot suoritettiin jakson numeron mukaisessa järjestyksessä. Jakson 4 jälkeen siirryttiin jaksoon 3 ja suoritettiin lämpötilajaksot päin vastaisessa järjestyksessä.

Kokeessa tallennusväli kosteuskokeessa oli 15 minuuttia. Mittausantureita rakenteen sisällä oli 4 kappaletta. Kaikki mittausanturit sijaitsivat keskilinjalla pilarien välissä keskellä mineraalivillaa kuvan 7 mukaisissa kohdissa. Lisäksi sääkaapin sisällä ja huonetilassa oli mittausanturit.

Harkkojen väliin asennettujen putkien avulla seinää kasteltiin kokeen aikana 2 kertaa, jotta vanhan rakenteen kuivumista voitaisiin myös tutkia. Molemmilla kastelukerroilla harkkojen väliin valutettiin noin 0,5 litraa vettä. Kastelu toteutettiin letkulla eri harkkojen väliin, jotta harkkokuori saataisiin tasaisesti kasteltua.

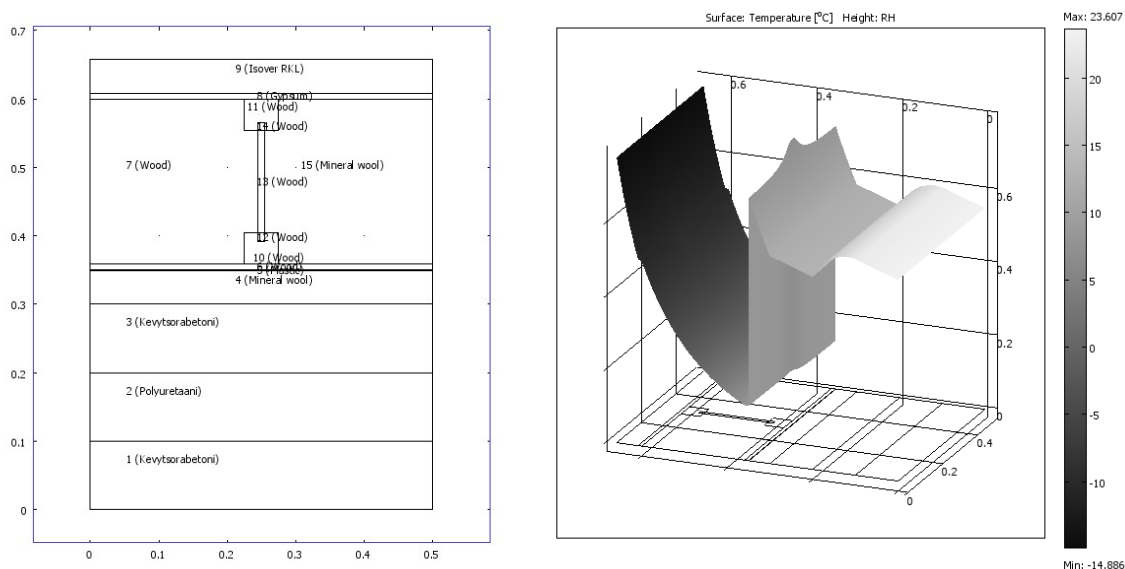


Kuva 7. Antureiden paikat ja koeseinän rakenne.

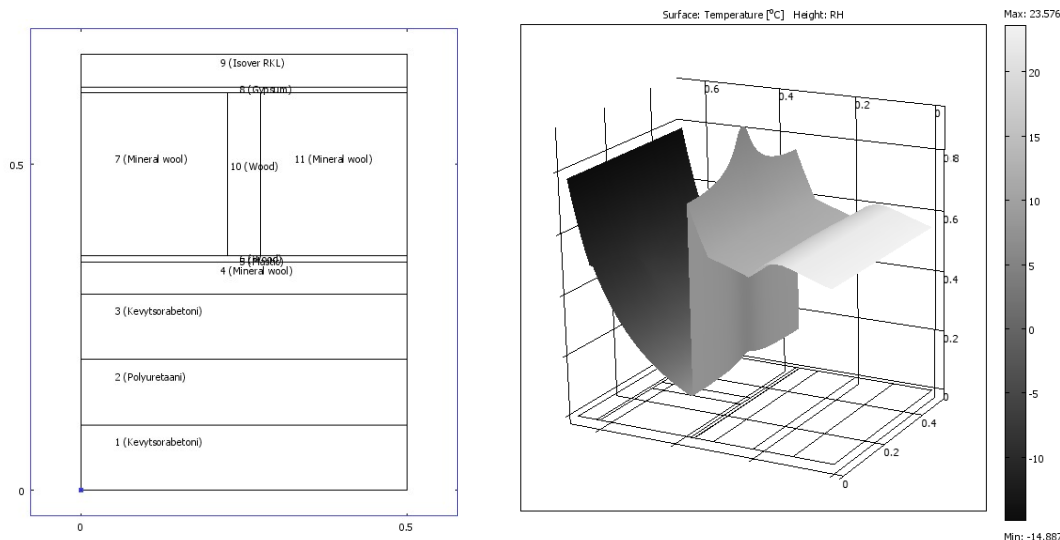
Huonetilan ilmaa rajattiin rakentamalla väliaikainen ”huppu” seinän ympärille. Tämä suojahuppu ei ollut kuitenkaan ilmatiivis, joten sen tarkoitus oli lähinnä tasoittaa suhteellisen kosteuden vaihteluita sekä suojata seinärakennetta.

### 3.2.5 Epästationaarisen kosteuskokeen analyttisen simuloinnin tulokset

Analyttinen simulointi tehtiin stationaaritilassa käyttäen mittaustuloksiin verrattavia reunaehtoja tammikuun olosuhteiden mukaan (sisällä  $T = 24\text{ °C}$  ja  $R = 55\%$ , ja ulkona  $T = -15\text{ °C}$  ja  $R = 78\%$ ). Simulointimalli ja analyysin tulokset ovat esitetty kuvissa 8 ja 9.



Kuva 8. Koeseinän simulointimalli ja laskettu tulos uumapilarin kohdalta (kuvaajan korkeus esittää suhteellista kosteutta (-) ja väri lämpötilaa ( $^{\circ}\text{C}$ )).

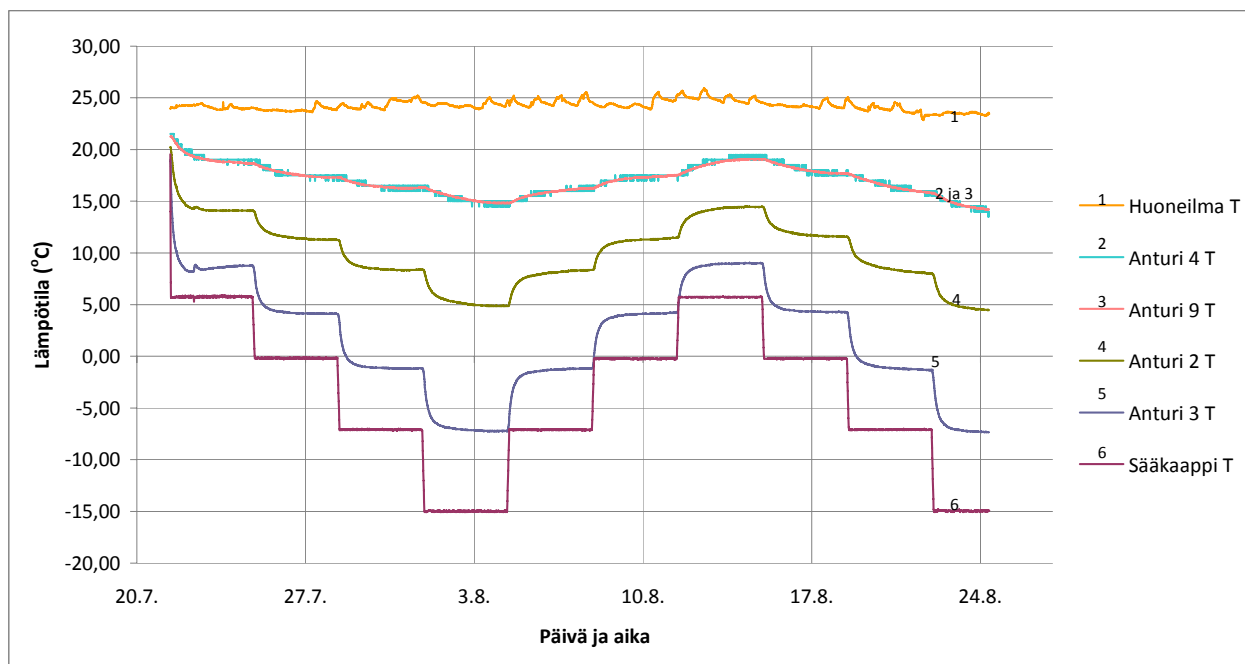


Kuva 9. Koeseinän simulointimalli ja laskettu tulos sahatavarapilarin kohdalta (kuvaajan korkeus esittää suhteellista kosteutta (-) ja väri lämpötilaa ( $^{\circ}\text{C}$ )).

Kuvista 8 ja 9 nähdään suuri suhteellisen kosteuden huippu höyrinsulun sisäpinnalla. Uumapilarin tapauksessa huippu on matalampi (alle 80 %) kuin sahatavarapilarin kohdalla (yli 80%). Kuitenkin molemmissa tapauksissa olosuhteet ovat myönteiset homeen kasvulle, kun lämpötila kyseisessä kohdassa on yli  $5^{\circ}\text{C}$ . Tämä ongelma johtuu oikeaan toteuttamistapaan nähdessä virheellisestä koejärjestelystä, jossa rakenteeseen on sijoitettu kaksi tiivistä kerrosta eri lämpötila vyöhykkeille.

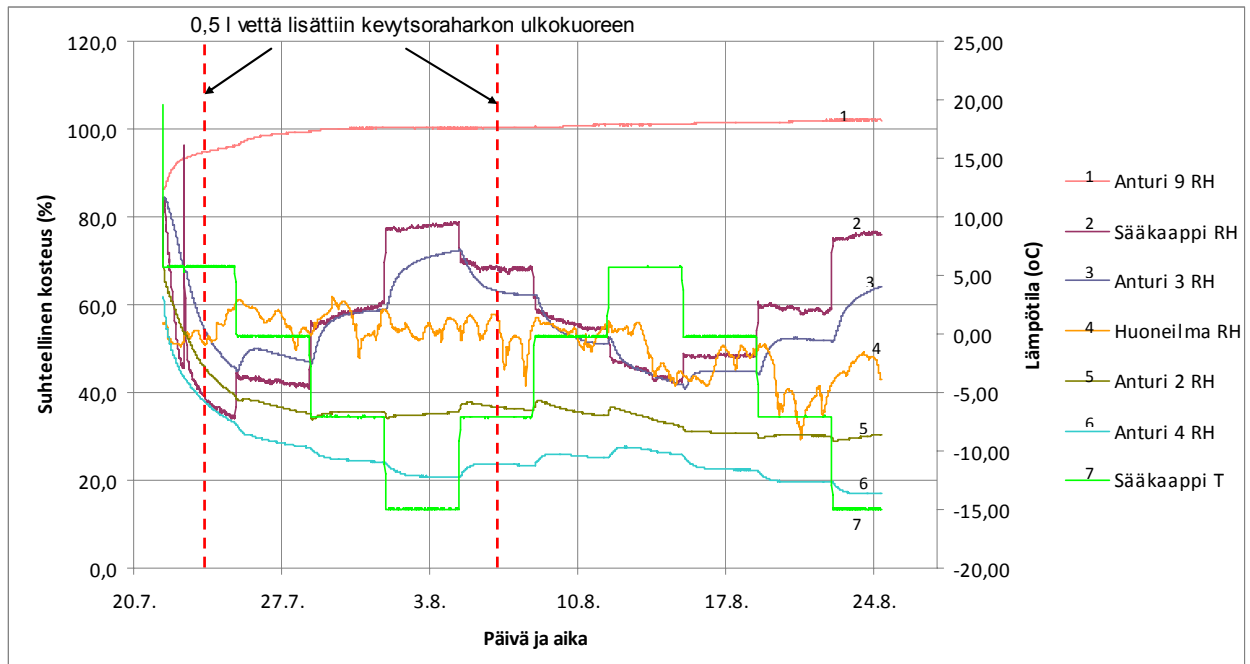
### 3.2.6 Epästationaarisen kosteuskokeen mittaustulokset

Kokeessa mitatut lämpötilajakaumat ovat esitetyt kuvassa 10 ja vastaavasti suhteellisen kosteuden jakaumat kuvassa 11. Kuvaan 11 on merkattu pystykatkoviivoin ajanhetket, jolloin harkkoseinän ulkokuorta kasteltiin 0,5 l vesimäärällä.



Kuva 10. Epästationaarisen koestuskokeen lämpötilamittausten tulokset.

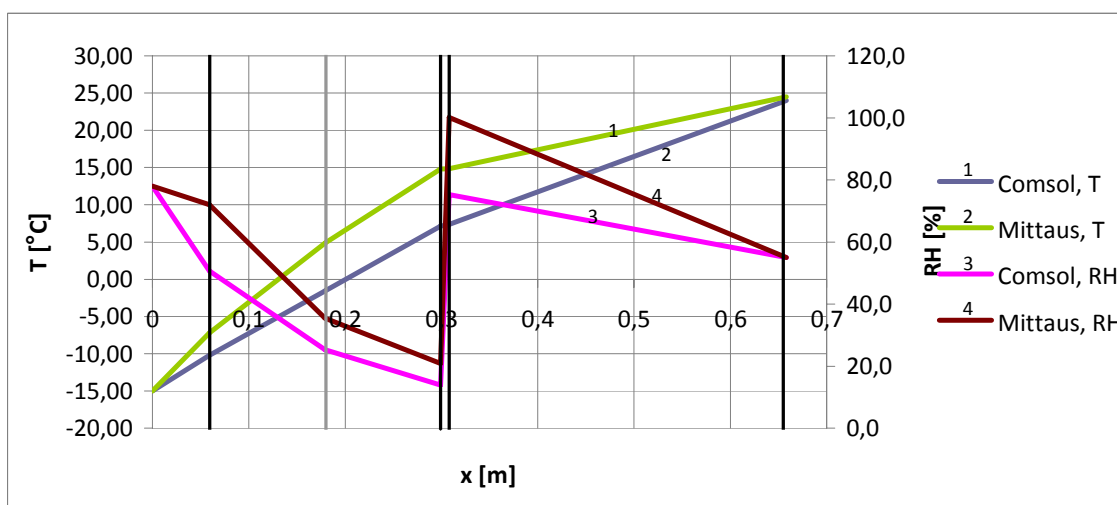




Kuva 11. Epästationaarisen kosteuskokeen suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset (kuvaajaan on lisätty sääkaapin lämpötila selkeyttämään kokeen vaihetta).

### 3.2.7 Epästationaarisen kosteuskokeen tulosten vertailu ja johtopäätökset

Kosteuskokeen tarkoituksena oli selvittää TES elementin kosteustekninen toimivuus koestusolosuhteissa. Kuvasta 10 nähdään, että lämpötilamittauksissa ei syntynyt mitään ongelmia. Lämpötilat rakenteissa tasaantuivat vastaamaan stationaaritilannetta jo noin vuorokauden aikana. Niin ollen epästationaarisuus ei tuonut lisäinformaatiota rakenteen lämpöteknisestä toimivuudesta. Tulosten vertailukuvaajasta (kuva 12) nähdään, että höyrinsulun kohdalla mitattu lämpötila on suurempi kuin simuloitu lämpötila. Tämä johtunee epätiiviyistä kevytsoraharkkokerroksesta, jolloin harkkokerros ei toimi niin hyvänä lämmöneristeenä kuin on odotettu. Mittaustulos kuvaa hyvin epätiivin seinärakenteen tapausta.



Kuva 12. Epästationaarisen koestuskokeen analyttisten tulosten (Comsol) ja mittaustulosten vertailu mittauspisteissä.

Suhteellisen kosteuden kuvaaja (kuva 11) osoittaa, että koestuselementti on toiminut hyvin koeolosuhteissa. Minkään anturin suhteellinen kosteus, lukuun ottamatta anturia 9 (kuvan 11 käyrä 1), ei ole noussut tiivistymisen tai homeen kasvun kannalta haitalliselle tasolle. Anturi 9 kohdalla, eli höyrinsulun lämpimällä puolella, suhteellinen kosteus nousi haitallisen korkeaksi. Tämä koejärjestykseen liittyvä ongelma johtui lähinnä siitä, että rakenteessa oli kaksi tiivistä vettä läpäisemätöntä kerrosta: kevytsoraharkon eriste sekä muovikalvo. Koe osoittaa, että on erittäin tärkeä suunnitella tarkkaan elementin mukana lisättävän ilmansulku vesihöyrynläpäisevyyden suhteen riippuen vanhasta rakenteesta.

Kuvan 11 perusteella suhteelliset kosteudet rakenteessa noudattavat melko hyvin simuloinnin tuloksia. Ainoastaan edellä mainittu höyrinsulun lämmin puoli poikkeaa eniten tuloksista harkkorakenteen kastelun takia.

#### **4. Yhteenveto**

Rakennusfysikaalisten kokeiden perusteella voidaan sanoa TES-elementtien toimivan hyvin ja hallittavasti ainakin kokeeseen luoduissa olosuhteissa lukuun ottamatta kokeessa huomattua tiivistymistä ja homeriskistä höyrinsulun lämpimälle puolelle. Kyseinen ongelma johtui rakenteeseen luodusta kahdesta tiiviistä kerroksesta eri lämpötilavyöhykkeillä. Ongelma vaan korosti kosteusteknisen suunnittelun tärkeyttä rakenteiden toimivuuden varmistamiseksi.

Oleellista oli numeeristen ja kokeellisten tulosten välinen yhteensopivuus, joka mahdollistaa rakenteen tuotekehityksen ja suunnittelun myös laskennallisilla menetelmin.

#### **Lähdeluettelo**

- [1] Passiivitalo – Energian kulutus. VTT 2006. [viitattu 31.8.2009].  
[http://passivehouse.vtt.fi/energian\\_kulutus.html](http://passivehouse.vtt.fi/energian_kulutus.html)
- [2] TTY Rakennetekniikka. Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja ohjeisiin, loppuraportti. 2008. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. 88 s.
- [3] RIL 107-2000. 2000. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Rakennusinsinööriliitto. 211 s.

# Uusi energiatehokas julkisivujen saneerausmenetelmä

Jussi Kurikka, Pasi Käkelä ja Janne Jormalainen  
SPU Systems Oy

## Tiivistelmä

Julkisivujen saneeraus tulee lisääntymään voimakkaasti seuraavien vuosien aikana, kun 60-70-lukujen talojen ulkokuorien käyttöikä täyttyy. Saneerauksessa tullaan yhä enemmän kiinnittämään huomiota korjausten energiatehokkuuteen ja tietenkin rakenteen toimintaan. SPU Systems Oy:ssä on kehitetty uusi julkisivusaneeraus konsepti silmällä pitäen näitä seikkoja. SPU-eristeet ovat ominaisuuksiltaan kosteutta hyvin kestäviä eivätkä ne ime itseensä kosteutta. Diffusiotiiviillä laminaatilla pinnoitettuna ne toimivat täydellisenä höyrinsulkuna. Lisäksi oikein toteutettuna saavutetaan erinomainen ilmatiiviys. Rakennusfysikaalisesta toiminnasta on VTT:llä teetetty laskennallinen mallinnus, jonka tuloksena järjestelmän voitiin todeta toimivan moitteetta normaaleissa olosuhteissa. Lisäksi tyyppihyväksynnän mukaisilla detaljeilla on toteutettavissa kerrostalojen julkisivut aina 8-kerroksisiin rakennuksiin asti. Erittäin hyvän lämmönjohtavuuden omaavina eristeinä on helposti saavutettavissa aina matalaenergia ja passiivitaso. Energiasäästöä on saavutettavissa tehokkaasti liittyviä rakenteita vahventamalla vaihtamalla vanhojen vaurioituneiden eristeiden tilalle saman paksuinen SPU-järjestelmä.

## 1. Johdanto

Korjausrakentamisen volyyymi tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa entistä voimakkaammin, kun 60-70 –luvulla rakennettujen kerrostalojen julkisivujen käyttöikä lähenee loppuaan. Yleisesti tunnettua on, että tuona aikana tehdyt rakennusvirheet ja käytetyn betonin ominaisuuksien puutteet verrattuna tähän päivään. Rakenteissa on ilmennyt lisäksi kosteusteknisiä ongelmia, jopa homeen kasvua eristekerroksissa. Myöskään tuon ajan eristeiden lämmöneristysominaisuudet ja -määrät eivät vastaa tämän päivän vaatimuksia. Lisäksi korjausrakentaminen näyttölee suurta roolia, mitä tulee ilmastopoliittisiin energiatehokkuustavoitteisiin.

Tässä artikkelissa käsitellään SPU Systems Oy:ssä kehitettyä uutta korjauskonseptiä sekä sitä problematiikkaa, mikä yleensä liittyy julkisivujen korjauksiin.

## 2. Vanha seinärakenne

Yleisimmät ulkoseinien rakennekerrokset 1960 – 70 lukujen kerrostaloissa ovat yleensä ulkoa luetellen:

- Tiiliverhottu rakenne: Tiiliverhous + ilmarako + villaeriste + kantava sisäkuori
- Sandwich-rakenne: Betoniulkokuori + villaeriste + betonisisäkuori
- Kevyt seinärakenne: Julkisivuverhous + ilmarako + koolaus ja villaeriste + sisäverhous

Villaeristeen paksuus on yleensä 70 – 90 mm kaikissa rakenteissa.

## 2.1 Rakennusfysikaaliset ongelmat

### 2.1.1 Tiiliverhottu rakenne

Vanhoiden tiiliverhottujen seinien suurin ongelma syntyy tuuletusraon puutteesta. Vaikka rakenteeseen on suunniteltu sen ajan vaatimusten mukainen tuuletusrako, on se käytännössä toimimaton, koska muurauslaastin purseet ovat monessa tapauksessa tukkineet ilmaraon. Tiileen ja tiilisaumoihin imeytyvä vesi ei pääse valumaan tuuletustilassa alas eikä kuivumaan tuulettamalla, vaan siirtyy vähitellen lämmöneristeeseen. Lämmöneristeen kostuessa riittävästi sen lämmöneristyskyky vähenee merkittävästi. Eristetilan kastuminen luo niin ikään mikrobi- ja homeenkasvulle otolliset olosuhteet. Ilmanvaihdon alipaineisuudesta johtuen mikrobeja, hajuja, kaasuja yms. saattaa siirtyä huoneistoihin aiheuttaen sisäilmaongelmia ja sitä kautta asukkaiden oirehtimista.

### 2.1.2 Sandwich –rakenne

Vanhoiden betonisandwich –seinien ongelmien syytä on varmasti useita, mutta kaksi niistä erottuu selvästi yleisimpinä. Ulkokuori on suunniteltu ajan säädösten mukaan ja ollen useimmiten 50 – 60 mm paksuja. Lisäksi rauditus on tehty usein ”mustasta” raudasta eikä ruostumattomasta, kuten nykyään. Raudituksen ruostuminen aiheuttaa ulkokuoren halkeilua ja rapautumista. Vettä pääsee yhä enemmän ulkokuoren sisään aiheuttaen pakkasrapautumista. Pakkasvauriot rikkovat kuorta yhä enemmän ja lopulta vesi pääsee eristetilaan, jolloin seuraukset ovat samankaltaisia kuin tiiliseinissä. Eristeen tuuletusurien puuttuminen estää myös rakenteen kuivumisen.

Toinen yleinen vaurion syy johtuu elementtien saumauksista. Rakennusten elementtisaumausten kunnossapito laiminlyödään ja vesi pääsee haljenneista saumoista ulkokuoren taakse eristetilaan. Saumoissa oleva vesi ja saumojen takana olevat märät eristeet jäätyvät ja rapauttavat ulkokuorta, jolloin vettä pääsee eristetilaan yhä enemmän ja vaurio etenee yhä nopeammin. Seuraus on sama kuin tiiliverhotuissa seinissä.

### 2.1.3 Kevyt seinärakenne

Kevyiden, ei-kantavien seinärakenteiden ongelmat ovat varsin perinteisiä. Suurimmat syyt ovat työvirheet, huono ilmatiiviys ja höyrynsulun toimimattomuus.

Höyrynsulut ovat rikki, huonosti asennettu tai niitä ei ole ollenkaan. Sisäilman kosteuden jatkuva pääsy rakenteeseen aiheuttaa lahoamista, mikrobi- ja homekasvustoa ja muita kosteusvaurioita rakenteeseen.

Toinen merkittävä vaurioiden aiheuttaja on ollut lämmöneristeiden huolimaton asennus. Julkisivua purettaessa on pystyrakojen sivuilla havaittu jopa kahden sentin rakoja. Näistä vuotokohdista lämmöneristeet ovat olleet kauttaaltaan noessa (kuva 1). Noki, lika tai pahimmissa tapauksissa mikrobit voivat siirtyä huoneistoihin ilmanvaihdon alipaineisuudesta johtuen sisätiloihin ja aiheuttaa oireita asukkaille.



Kuva 1. Vanhan vuotavan seinärakenteen vaurioitunutta rakennetta.

## 2.2 Perinteinen korjaus

### 2.2.1 Tiiliverhous ja sandwich -ulkokuori

Perinteisessä korjaustavassa vanha tiiliverhous 70 – 90 mm:n villaeristeineen puretaan, sisäkuori painepestään sekä tasoitetaan jopa 60 mm:n kerroksella (kuva 2). Eristeet korvataan vastaavilla eristeillä, mutta ilmarako tiilen taakse tehdään nykymääräysten mukaan.

Sandwich –ulkokuoren saneeraus tehdään periaatteessa kuten tiiliverhouksessakin, puretaan ulkokuori ja eristekerros sekä pohja pestään ja tarvittaessa tasoitetaan. Sisäkuorta vasten asennetaan entisen vahvuinen villaeriste. Ulkokuoren ja eristeen väliin on kuitenkin saatava aikaan nykymääräysten mukainen tuuletusrako, jolloin rakenteen paksuus kasvaa (kuten tiiliverhouksenkin kanssa). Rakenteen paksuus siis kasvaa tuuletusraon muutoksen sekä tasoitekerroksen verran eli noin 70 – 80 mm lämmöneristävyyden kuitenkin parantumatta.

Rakenteiden lämmöneristyskykyä voidaan tietenkin parantaa lisäämällä eristeen määrää, mutta tällöin rakenteen kokonaispaksuus kasvaa jo reilusti aiheuttaen rakennusteknisiä vaikeuksia sekä lisäkustannuksia liittymissä mm. sokkeliin, räystäsiin jne..



Kuva 2. Purettu, painepesty vanha seinärakenne.

### 2.2.2 Kevyt seinärakenne

Kevyet, puurunkoiset, ei-kantavat julkisivut puretaan yleensä ainoastaan sisäverhousta myöten (ei kokonaan), koska asukkaat asuvat huoneistoissa remontin ajan. Tällöin höyrinsulku yleensä rikkoutuu tai se havaitaan rikkinäiseksi tai ettei sitä ole ollenkaan. Höyrinsulku on välttämätön tällaisessa rakenteessa, joten ulkopuolelta asennettuna se on suunniteltava kiinnitettäväksi runkoon höyryntiiviisti. Jossain tapauksissa on esitetty suunnitelmia, joissa asunnon sisäverhouksen pintakäsittely on ehdotettu tehtäväksi vesihöyryntiiviiksi. Kyseinen ratkaisu ei tunnu kovin mielekkäältä, koska asunnon sisäpinnat ovat asunnon haltijan vaihdettavissa. Tällainen ratkaisu vastaisi juridiikaltaan sekä toiminnaltaan kosteiden tilojen kosteus- ja vedeneristeitä. Ulkoa asennettuna höyrinsululla ei myöskään voi kiertää runkotolppia ulkopuolelta, koska silloin vesihöyry tiivistyy runkotolpan ulkopintaan ja kosteusvahingot ovat vääjäämättömiä. Höyrinsulun saaminen oikein sijoitetuksi ja vesihöyryntiiviiksi tällaisessa saneerausrakenteessa on käytännössä mahdotonta ja tällainen rakenne on jo suunniteltaessa rakennusfysikaalisesti arveluttava ja vaarallinen.

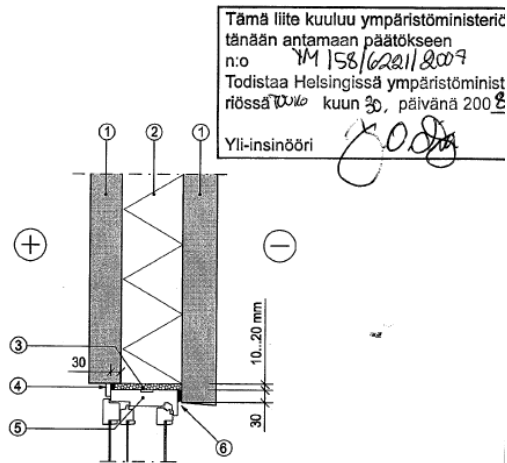
## 3. Tyyp hyväksyntä

SPU Systems Oy:llä on ympäristöministeriön tyyp hyväksyntäpäätös, jonka mukaan lämmöneristettä voidaan käyttää enintään kahdeksankerroksisen P1-luokan rakennuksen ulkoseinän lämmöneristykseen ja tiivistämiseen Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 kohdan 8.3.1 mukaisena rakennustarvikkeena edellyttäen, että ulkoseinään liittyvän osastoivan rakennusosan osastoivuusvaatimus on enintään 60 minuuttia. [1]

Tyyp hyväksynnässä esitetään detaljeja mm. ikkunaliittymien osalta, millä tavoin ne tulee toteuttaa, että vaaditut RakMk osan E1 vaatimukset täytetään. Pääperiaatteena detaljeissa on riittävä suojaus eristetilaan. Suojaus voidaan tehdä käyttämällä hyväksi ikkunakarmia (kuva 3) tai erillistä palosuojakerrosta (kuva 4). Käytettävä suojaustapa riippuu siitä, onko elementti tuulettuva vai ei ja tietysti ikkunakarmin leveydestä. Tyyp hyväksyntäpäätös on saatavilla mm. SPU Systems Oy:n kotisivuilta.

# 1A NORMAALI SANDWICH-ELEMENTTI

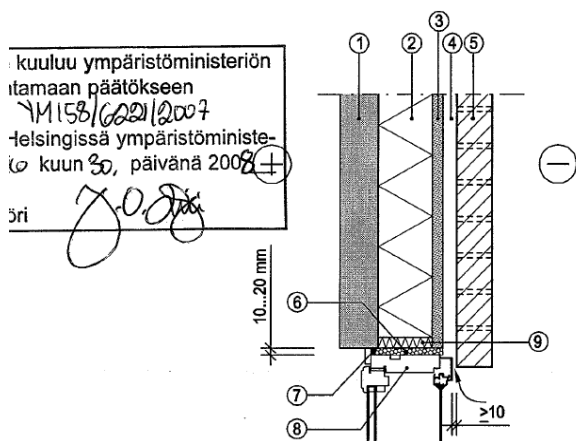
- PYSTYLEIKKAUS / IKKUNA TAI OVI



Kuva 3. Tyypihyväksyntädetalji 1A [1].

# 2B ILMARAOLLINEN RAKENNE

- PYSTYLEIKKAUS



Kuva 4. Tyypihyväksyntädetalji 2B [1].

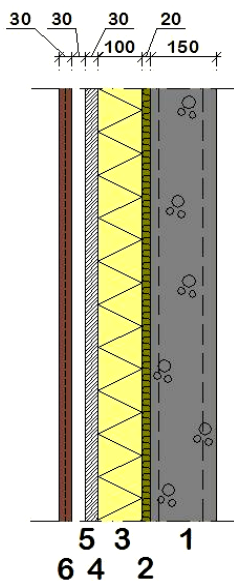
## 4. SPU saneeraus

### 4.1 Menetelmäkuvaus

Kaikkien seinärakenteiden saneerauksissa SPU-eristeillä noudatetaan samaa periaatetta. Pyritään säilyttämään vanhan seinärakenteen paksuus mahdollisimman lähellä vanhaa rakennetta sekä samalla parantamaan rakenteen lämmöneristyskykyä sekä tiiviyyttä ja höyrynpitävyyttä. Erittäin hyvän lämmöneristävyyden ( $\lambda_{\text{desing}} 0,024$ ) lisäksi vastaa esim. SPU AL 30 mm vesihöyrynvastukseltaan noin 8 höyrynsulkumuovia. SPU-eristeet ovat siis umpisoluisena materiaalina ilman- ja höyryntiiviitä eivätkä sido itseensä kosteutta.

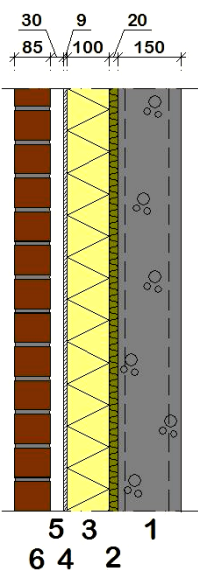
## 4.1.1 Tiiliverhous tai kevyt julkisivu

Vanha tiiliverhous eristyksineen puretaan ja sisäkuori pestään. Suurimmat epätasaisuudet piikataan pois ja syvennykset tasoitetaan. SPU-eristettä voidaan tarvittaessa myös paikallisesti työstää suurimpien epätasaisuuksien kohdalta. Kun tuuletusraon sisäpinnalle asetetaan palovaatimuksia, voidaan eristeen tuuletustilan puoleisen pinnan palo- ja pintaluokkavaatimus täyttää joko hyväksytyllä mineraalivillalla tai tuulensuojakipsilevyllä [1]. Palosuojavilla asennetaan SPU-eristeen pintaan muuraustyön yhteydessä (kuva 5) tai käytettäessä kipsilevyä, se liimataan SPU-eristeeseen kiinni jo tehtaalla (kuva 6). Julkisivuverhouksen tiili toimii seinässä varsinaisena palosuojana. Käytettäessä kevyitä julkisivuja, esim. laattoja, täytyy PU-eristeen pintaan tulevan tuulensuojavillan täyttää sille asetetut palovaatimukset, koska julkisivuverhousta ei katsota palosuojaksi (kuva 5). Pehmeä villakerros, joka kiinnitetään työmaalla eristeen taakse, esim. nitojalla, estää ilman liikkeen eristeen ja sisäkuoren välissä. Lisäksi eristeen saumojen vaahdotus rajoittaa ilman liikettä entisestään (ks. kohta 4.3.)



1. Vanha betonisisäkuori
2. Puristettu pehmeä villa >20 mm
3. SPU AL -eriste (paksuus vaaditun U-arvon mukaisesti)
4. A2-S1, d0 sekä palovaatimukset täyttävä villa tai muu materiaali
5. Tuuletusrako
6. Pelti, julkisivusaneerauslevy tai vastaava

Kuva 5. SPU menetelmä, palonsuojavillaratkaisu.



1. Vanha betonisisäkuori
2. Puristettu pehmeä villa >20 mm
3. SPU AL -eriste (paksuus vaaditun U-arvon mukaisesti)
4. Tuulensuojakipsilevy 9 mm liimattuna SPU- eristelevyyyn
5. Tuuletusrako
6. Tiilimuuraus 85 mm (toimii palosuojana)

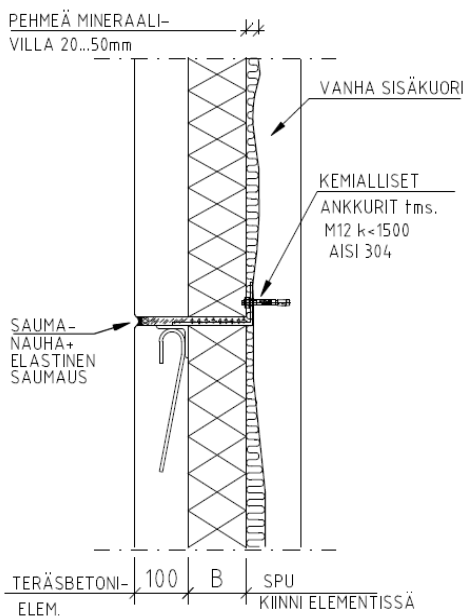
Kuva 6. SPU menetelmä, kipsilevy tuulensuojana.



#### 4.1.2 Sandwich –ulkokuori

Vaihdettaessa betonielementtien ulkokuoria suoritetaan purkutyöt kuten tiiliseiniénkin yhteydessä. Maksimissaan kolmikerroksisissa seinissä muutetaan seinärakenteen toimintaa siten, että ulkokuoret suunnitellaan kantamaan itsensä ja yleensä sokkelit vahvistetaan sen mukaisesti. Yli kolmikerroksisten seinien ulkokuoret joudutaan kannattelemaan sisäkuoresta tai muulla tavoin erikoissuunniteltuna tapauskohtaisesti.

Suuri osa perinteisesti työmaalla tehtävistä töistä tehdään jo tehtaalla, joten työmaa-aika lyhenee. SPU-eriste itsessään valetaan ulkokuoreen kiinni jo elementtitehtaalla. Eristeen takapintaan kiinnitetään työmaalla pehmeä villa ja elementti eristeineen nostetaan paikalleen ja kiinnitetään erikoiskiinnikkein puristamalla sisäkuoreen (kuva 7). Kiinnikejärjestelmä mahdollistaa nopean asennuksen epätasaiselle alustalle ilman esitasoitusta. Pehmeä villa eristeen takana toimii samalla periaatteella tiilisenässäkin. Myös elementtien saumat vaahdotetaan sisäkuoreen asti. Rakenteen kokonaispaksuus pysyy lähes alkuperäisen kaltaisena, koska ulkokuoreen tehtaalla valettu eriste ei tarvitse lainkaan ilmarakoa. Sekä tiiliseinän että betoniulkokuoren lämmöneristyskyky verrattuna vanhaan kostuneeseen rakenteeseen paranee merkittävästi ja energian kulutus putoaa luonnollisesti samassa suhteessa. Työn aikana ei tarvita huputtamista eikä telineitä.



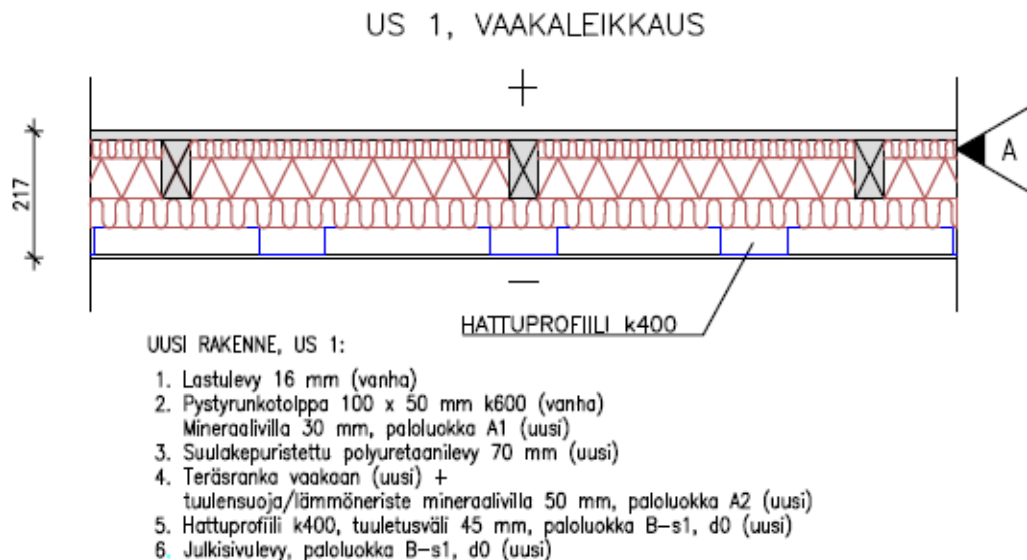
Kuva 7. SPUsaneerausmenetelmä, betonisandwich-rakenne.

#### 4.1.3 Kevyet, ei-kantavat julkisivut

Kun vanhat villaeristeet ja mahdolliset höyrynsulut on purettu sisäverhouskeeseen asti, aloitetaan saneeraus SPU AL -eristeellä. Sisäverhouslevyn ulkopintaan asennetaan normaalisti 30 mm:n palovilla, joka estää eristettä saavuttamasta palotilanteesta syttymislämpötilaa (300 - 400 °C). Villan ulkopuolelle rungon väliin asennetaan ja vaahdotetaan SPU-eriste, joka toimii samalla sekä tuulensuojana että höyrynsulkuna taaten maksimaalisen ilmatiivyyden (kuva 8 ja 9). Vaahdotus ja SPU-eriste on ainoa tapa saada aikaiseksi ulkopuolelta tehty tiivis höyrynsulku oikeaan paikkaan ja rakennusfysikaalisesti turvallinen rakenne. SPU-eristeen ulkopintaan asennetaan määräysten mukainen palosuojavilla. Tämän jälkeen voidaan julkisivu suunnitella arkkitehtuuristen ja julkisivuvaatimusten mukaisesti.



Kuva 8. SPUsaneerausmenetelmä, kevyt ei-kantava julkisivu.



Kuva 9. SPUsaneerausmenetelmä, kevyt ei-kantava julkisivu, rakenneleikkaus.

## 4.2 Rakennusfysikaalinen toiminta

### 4.2.1 VTT raportti

SPU Systems Oy on teettänyt kuvassa 4 esitetyllä rakenteella rakennusfysikaalisen mallinnuksen VTT:llä. Sisäilman kosteuskuormitus valittiin standardin EN 13788 kosteusluokan 2 arvoja. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jyväskylän vuoden 1979 säätietoja. Sateen, auringon säteilyn tai konvektion vaikutuksia ei huomioitu. Selvitys tehtiin käyttäen WUFI 4.2 Pro -ohjelmaa.[2]

Betonin alkukosteus oletettiin 80 % RH suhteellista kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen. Betonikerros oli tarkastelussa huomattavasti korkeammassa kosteudessa kuin sisäpuolinen betonikuori tyypillisesti on. Tämä tuo tarkasteluun varmuutta. Rakenne oletettiin ilmatiiviksi ja tuuletusväliin oletettiin ulkoilman olosuhteet. Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet on

esitetty taulukossa 1. Tiiliverhouksen kosteusoloja ei tarkasteltu, vaan tarkastelu keskittyi varsinaisen eristerakenteen toimivuuden selvitykseen. Tarkastelujakson pituus oli kolme vuotta [2]

*Taulukko 1. Rakenteiden eri kerrosten dimensiot, lämmönjohtavuudet ja kerrosten vesihöyryn diffuusiovastukset [2].*

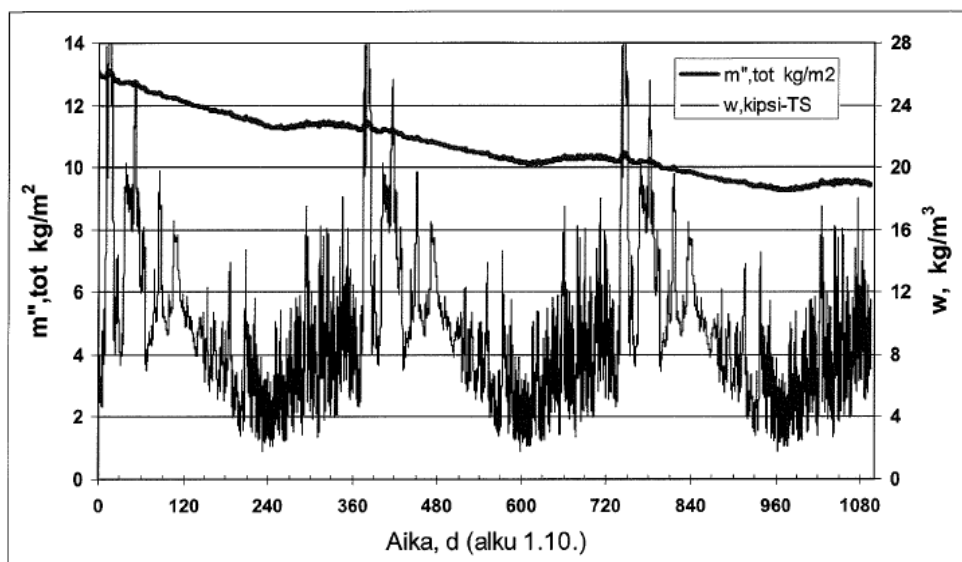
Materiaalikerros	Paksuus, mm	Lämmönjohtavuus $\lambda_{\text{design}}$ , W/(K m)	Kerroksen vesihöyrynvastus $S_d$ , m
Betoni	150	1,7	30
PU-eristys (paperipinta)	120	0,024	6
Mineraalivilla	20	0,041	0,05
Sisätasoite ja maali	5		0,1

#### 4.2.2 Tulosten yhteenveto

Tarkastelluissa tapauksissa rakenteen kosteustekninen toiminta on turvallista Suomen ilmasto-olosuhteissa asuinkäyttöön tarkoitetuissa sisäilman kuormitusoloissa. Rakenteen kuivumiskyky pystyi varmistamaan betonikuoreen ylimääräisen kosteuden tuulettumisen rakenteesta haittaa aiheuttamatta. Rakenteen kuivumista on esitetty kuvassa 10. Rakenne on kosteusteknisesti toimiva ja turvallinen myös käytettäessä alumiinipintaista SPU-eristettä. tällöin betonikuori voi kuivua vain sisäilmaan päin, mikä pitää ottaa huomioon sen alkukosteudessa ja mahdollisesti sen sisäpuolen vesihöyrynläpäisevyydessä.[2]

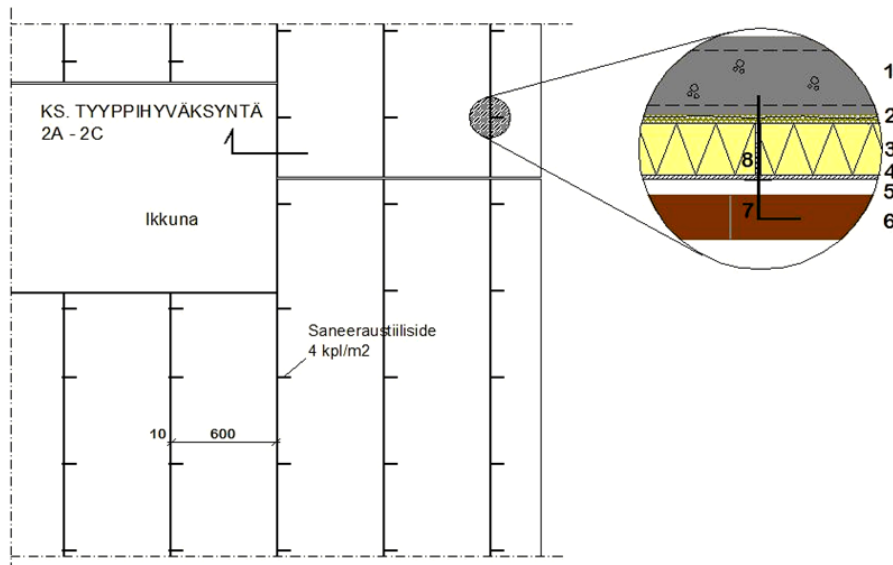
Mahdolliset kosteusteknisen toimivuuden riskit liittyvät betonikuoreen liian korkeaan alkukosteuteen (kastunut rakenne, jota ei ole kuivattu ennen lämmöneristeen asennusta) ja ulkoverhouksen puutteelliseen suojaan sateen tunkeutumista vastaan. Nämä riskit eivät liity suoraan eristekorjauskonseptin rakenteeseen, vaan työtappoihin ja muihin detaljeihin.[2]

Alkuperäinen tutkimusselostus on saatavilla SPU Systems Oy:stä.



*Kuva 10. Tarkastellun rakenteen kokonaiskosteus ja tuulensuojakipsilevyn kosteuspitoisuus kolmen vuoden tarkastelujakson aikana, kun lämmöneristeenä oli SPU:n paperipintainen eristyslevy [2].*

### 4.3 Eristeiden asennus kantavaan sisäkuoriseen seinään



Kuva 11. SPU saneerausmenetelmä, eristeiden asennus.

Eristelevyt voidaan asentaa joko 1200 mm tai 600 mm leveinä. Mikäli levyt asennetaan 1200 mm leveinä, joudutaan poraamaan ja vaahdottamaan tiiliseinäversiossa eristeen keskelle tiilisiteet niin, että vaatimustaso  $4 \text{ kpl/m}^2$  täyttyy. Eristelevyjen väliin jätetään 10 mm:n rako, josta saneeraustiilisiteet tulevat läpi. Tiilisiteillä kiristetään eristelevyt ja pehmeä villa sisäkuoreen ja eristeiden välinen rako vaahdotetaan sisäkuoreen asti (kuva 11). Näin ilmankierto eristeen takana on estetty.

## 5. Yhteenveto

Tulevaisuuden korjausrakentamisen toteutus ja sen suunnittelu pohjautuu terveen, turvallisen ja energiatehokkaan rakenteen saavuttamiseen. Korjattavien rakenteiden dimensiot on saatava pysymään aisoissa. Lisäksi määräykset tulevat puuttumaan yhä enemmän korjattavien rakenteiden energiatehokkuuden parantamiseen. Kosteusteknisen toiminnan ja ilmatiiviiden hallinta korjattavissa rakenteissa näyttää yhä suurempaa roolia. Korjaussuunnittelussa tulee yhä enemmän ottaa huomioon myös korjattavien rakenteiden yksinkertaisuus ja helppous, jolloin työvirheiden osuutta voidaan myös täten minimoida. SPU Systems Oy:ssä kehitetyllä saneerauskonseptilla pystytään oikein toteutettuna saavuttamaan toimiva lopputulos. Ilmatiiveys toteutuneissa kohteissa on ollut jopa alle 0,5 ( $n_{50}$ ) ja höyrinsulkuna diffuusiotiivis SPU-eriste vastaa vesihöyrinvastukseltaan 8 höyrinsulkumuovia. Käyttämällä kipsilevyä tai ohutta palovillakaistaa apuna pystytään täyttämään myös P1 luokan rakennusten palovaatimukset. Ja lisäämällä SPU-eristevahvuutta saavutetaan helposti matalaenergia- ja jopa passiivienergiataso.

## Lähdeluettelo

- [1] Tyyppihyväksyntäpäätös YM158/6221/2007. Ympäristöministeriö 2007.
- [2] SPU Systems Oy:n seinärakenteen korjauskonseptin kosteustekninen toimivuus. Tutkimuslauseke Nro VTT-S-01984-09. 20.3.2009.

## **5. Ikkunat**



# Ikkunoiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät ja ikkunat sisäilman olosuhteiden indikaattorina

Timo Kauppinen<sup>1</sup>, Ismo Heimonen<sup>1</sup>, Kari Hemmilä<sup>1</sup> ja Markku Riihimäki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VTT

<sup>2</sup> Innoriihi Oy

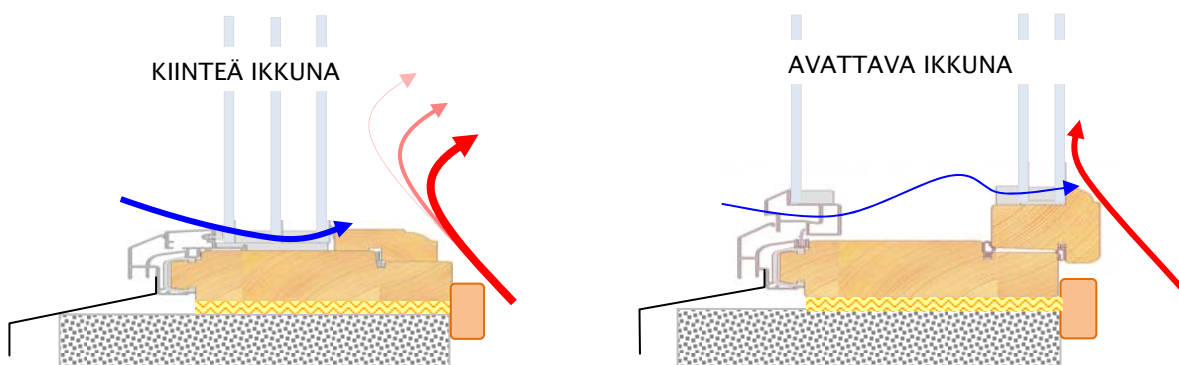
## Tiivistelmä

Tässä esityksessä esitetään ikkunoiden toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä valmistajan/käyttäjän näkökulmasta, kuvataan rakennusfysiikallisia ilmiöitä mm. ikkunakondenssiin vaikuttavia tekijöitä ja ikkunoiden toimivuuden arviointia riskikartoituksen avulla. Tuloilmaikkunan ja poistoilmanvaihtojärjestelmän mahdolliseen toimimattomuuteen liittyvien riskien arvioinnin menettelytapa esitetään. Lisäksi kuvataan esimerkkitapaus, jossa tarkastellaan kenttämittausten avulla ikkunoiden lämpöteknistä toimivuutta sekä ilmanvaihdon, lämmitysjärjestelmän ja käytön vaikutusta toimivuuteen.

## 1. Johdanto - ikkunat huoneolosuhteiden mittarina ikkunatoimittajan ja käyttäjän näkökulmasta

### 1.1. Ikkunarakenteen yksityiskohtien vaikutus olosuhdeherkkyyteen

Ongelmatilanteet liittyvät useimmiten ikkunoiden puutteelliseen tiiveyteen, puutteelliseen lämmöneristävyyteen tai poikkeukselliseen kosteuskäyttäytymiseen.. Ikkunarakenteissa ja -tyypeissä on yksityiskohtia, jotka aiheuttavat joitakin ilmiöitä eri sisäolosuhteissa: Ikkunassa on rakenteesta johtuvia kapeita (eristyslasin reuna) ja pienialaisia (esim. kulmat, helan kohta) lämmöneristävyydeltään huonompia kohtia. Lasin reuna-alueen merkitys korostuu kiinteissä ja yksilehtisissä rakenteissa, esim. kiinteän ikkunan lasin reuna-alueen lämpötilaero keskimääräiseen pintalämpötilaan verrattuna on selvästi suurempi kuin vastaava kohta avattavassa ikkunassa (ks. kuva 1) – markkinoille tulleet uudet eristyslasin välilistamateriaalit korjaavat tilannetta.



Kuva 1. Ikkunan lämpö- ja ilmavirtauksia. Sisäpinnalla lämmin ilmavirtaus nousee ikkunan pintaa pitkin ylöspäin. Ikkunan läpi menevä lämpöhäviö on suurin lasin ja puitteen reuna-alueella (kuvassa lämpöhäviön suunta on vastakkainen kuin kuvan nuoli osoittaa).

Lasiaukon reuna-alueen haittavaikutusta voivat pahentaa erot rakenteen lämmöneristävytydessä ja ikkunan sijoitus seinärakenteeseen (syvyys- ja korkeusasema), esim. kriittinen kylmempi kohta jää kiinteässä ikkunassa kauas sisäpintaa pitkin nousevasta ilmavirtauksesta, jolloin epäedullisissa kosteusolosuhteissa kondenssiriski kasvaa (kuva 1).

## **1.2. Kohteen toteutuksen yksityiskohtien, sisäolosuhteiden ja talotekniikan vaikutus ikkunoiden toimintaan**

Ikkunoiden toimivuuteen ja toimintaedellytyksiin vaikuttavat monet kohde- ja rakennekohtaiset yksityiskohdat ja erityisesti rakennuksen talotekniikka. Laaja ikkunapintakeskittymä aiheuttaa usein ongelmia (kylmät pinnat, veto) ja edellyttää mm. lämmitykseen liittyviä erikoisratkaisuja. Ikkunan toimintaedellytyksiin vaikuttavat oleellisesti ympäröivät rakenteet, ikkunan sijainti (kuva 1), seinän syvennykset ja erkkerit, ulko- ja sisäkulmat, ikkunan alareunan korko lattiapinnasta, verhokotelot ja muut esteet sekä viereisen seinän/lattian/katon kohdekohtainen eristävyys ja tiiveys (ilmavuodot). Lämmitykseen ja lämmönjakoon liittyvät ratkaisut joko tukevat tai haittaavat ikkunan asianmukaista toimivuutta: lämmön määrä ja suuntautuminen ikkunaan, lämmön aiheuttamat lähivirtaukset tai niiden puute vaikuttavat olosuhteisiin.

Ilmanvaihdon avulla vaihdetaan ilmaa huoneesta samalla poistaen kosteutta huonetilasta. Tuloilma- ja poistoilmaventtiilien sijoittelulla vaikutetaan myös ilmavirtauksiin ikkunan pinnoilla. Yksi tyypillisimmistä ongelmatilanteista esiintyy kaksikerroksisen, avoportaikkaisen huoneiston yläkerrassa, kun riittämättömän tai huonosti hallitun poistoilmanvaihdon seurauksena syntyy ylipainetilanne, jonka seurauksena kostea ilma tunkeutuu ikkunapuitteiden väliseen tilaan ja kondensoituu lopulta ulkopuitteen lasipintaan. Ylimääräiset, runsaat kosteuslähteet lisäävät sellaisien poikkeuksellisten kosteusolosuhteiden syntymistä, joissa kondenssiriski kasvaa. Tällaisia tilanteita ovat mm. uusien rakenteiden kuivuminen, koristekasvien runsaasta kastelusta syntyvä kosteus, ilmankostuttimet, saunomisesta tuleva kosteuskuorma ja vesivuodot.

Talotekniikalla voidaan – toteutuksen onnistumisesta riippuen – joko korjata, pahentaa tai jopa synnyttää epäedullisia olosuhteita. Ongelmatilanteissa kysymys voi olla talotekniikan väärästä periaateratkaisusta suhteessa kohteen ominaisuuksiin, puutteellisesta tekniikan toimivuudesta, puutteellisesta tehokkuudesta, laitteiden toimimattomista säädöistä tai väärästä käytöstä. Yleisesti nykyisin käytetyt tekniikat eivät aina sisällä olosuhteiden tunnistusta tai automatiikkaa, vaan järjestelmät toimivat määritetyillä perussäädöillä, joita voidaan tarvittaessa muuttaa. Vaikka ikkunoihin liittyvät ongelmailmiöt ovat samantyyppisiä, kannattaa kysymystä tarkemmin käsitellä erikseen uudisrakentamisen ja perusparannuksen näkökulmista, sillä haittailmiöiden syissä, vaikutuksissa ja esiintymisessä on eroja.

### **1.2.1 Perusparannus ja korjaus - ikkunoiden vaihto**

Seinärakenneliittymän ja varsinkin ikkunan ilmatiiveys muuttuvat ratkaisevasti, kun vanha ikkuna vaihdetaan uuteen – itse asiassa tiiveyden parantaminen sekä energiansäästöön että asumismukavuuden vuoksi ovat yleisin ikkunavaihdon syy, ulkopuolen pintakäsittely- ja korjaustarpeen ohella. Ikkunanvaihtokohteessa on pääsääntöisesti edelleen käytössä vanha, talon rakentamisajan talotekniikka: ilmanvaihdossa on varsin harvoin tehty muutoksia ennen ikkunoiden vaihtoa – lämmityksen ja lämmönjaon muutoksia on saatettu tehdä.

Kun ikkunat vaihdetaan, lämmön ja ilmanvaihdon säädöt yleensä tarkistetaan ja tasapainotetaan uudelleen, ja joskus on tarpeen esim. lämmitystehon puutteen takia modernisoida koko järjestelmä. Yleinen koneellisen poistoon perustuvan ilmanvaihdon tarkistus on tärkeä erityisesti



siksi, että uudet tiiviimmät ikkunat vaikeuttavat korvausilman saantia. Vielä suurempi säätötarve aiheutuu uusien ikkunoiden ulkoilmaventtiileistä ja tuloilmaikkunajärjestelmästä. Ikkunoiden vaihtuessa tiiviimpiin, riittävän korvausilman saaminen on varmistettava suunnittelemalla hallitut tuloilmareitit ja säätämällä koneellisen poiston määrä suunnitelluksi.

Myös lämpötilajakauma ja ilmankierto huoneissa saattavat muuttua ikkunavaihdon yhteydessä; ilmanvaihto ja ilman liikkeet vaikuttavat oleellisesti huoneessa myös lämmön jakautumiseen ja ikkunan lähialueen lämpöolosuhde muuttuu – jopa enemmän ilmassan liikemuutoksesta kuin ikkunan eristävyysparantumisesta. Aikaisemmin ilmapuodosta johtuen täydellä teholla toiminut lämpöpatteri ”normalisoituu” termostaatin tai säädön jälkeen uuteen tilanteeseen, ja siten ikkunaan vaikuttanut konvektio tasaantuu: patterista tulevan lämmön vähetessä ikkunan kondenssiherkkyys voi jopa lisääntyä, varsinkin jos huonetilan ilmankosteus samalla nousee. Kosteustasolla ja ilmapuodolla on selvä riippuvuussuhde – ikkunoiden tiivistyessä entinen ilmapuodon kosteutta alentanut vaikutus heikkenee (korostuu ikkunan edessä), koska ulkoilma on lähes aina kuivempaa kuin huoneilma. Huoneolosuhteet voidaan pilata joskus asukkaan suorittamalla omilla säädöillä: säätö- tai vetoherkkyysyistä ilmavaihto saatetaan sulkea tai selvästi rajoittaa, jolloin kosteus ja epäpuhtaudet eivät poistu ilmanvaihdon mukana.

### 1.2.2 Uudisrakentaminen ja ikkunat

Uudisrakentamisessa ikkunoihin liittyvät ongelmat ovat osaksi samoja kuin ikkunavaihdossa. Uudessa rakennuksessa vaikeimmat olosuhteet keskittyvät kuitenkin rakentamisen aikaan ja käytön/asumisen alkuun, myöhemmät mahdolliset ongelmatilanteet ovat pääsääntöisesti samanlaisia kuin ikkunanvaihdon tapauksessa on esitetty. Yleisin ja merkittävin ongelmatilanne johtuu kuivien ikkunoiden puurakenteiden kastumisesta rakennustyömaalla; jo lyhytaikainen kastuminen voi aiheuttaa vaurioita, kastumisen pitkittymisestä ja/tai kuivumisen estymisestä ongelmat yleensä pahenevat ja laajenevat. Kyse on rakennustapavirheestä – nämä haitalliset tilanteet ovat lisääntyneet elementtirakentamisen yhteydessä ja siksi olisikin harkittava, tulisiko ikkunat asentaa jälkikäteen.

Toinen tyypillinen ikkunoiden kastumisen syy on ympäröivistä rakenteista ikkunoihin kohdistuva kosteusrasitus – tämä voi olla ongelman syynä myös ikkunavaihdossa (listoitukset, kattovuodot). Kolmas ongelma liittyy kosteusrasituksen pitkittymiseen, joka aiheutuu massiivisten betoni- yms. rakenteiden hitaasta kuivumisesta ja puutteellisesta rakennusaikaisen kosteuden poistamisesta huonetilasta. Rakennuksen valmistuttua ja rakenteiden kuivuttua kosteusrasitusten seurauksena syntyneet vahingot ilmenevät yleensä puuliitosten avautumisena, pinnan vaurioitumisena, maalin irtoamisena, ikkunoiden toimimattomuutena (väärät käyntivälit, puutteellinen tiiveys) ja visuaalisina vikoina.

### 1.3. Ikkunoiden puutteellinen toimivuus ja ratkaisumalleja korjaukseen

Ikkunoiden puutteellinen toimivuus, vauriot sekä niihin liittyvät syyt aiheuttavat ristiriitaisia käsityksiä ikkunoiden toimittajien, muiden toimijoiden ja asiakkaiden välillä. Taulukossa 1 on esitetty ikkunoiden vaihdossa esiintyviä ongelmia ja ratkaisuehdotuksia ja taulukossa 2 vastaavat uudisrakentamisen tapauksessa.

### 1.3.1 Ikkunoiden vaihto

*Taulukko 1. Ikkunoiden vaihdossa esiintyviä ongelmia ja ratkaisuehdotuksia.*

<p><b>Ylipaine huonetilassa</b> (väärä, puutteellinen tai väärin säädetty ilmanvaihto)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ikkunoiden sisäpuite ei ole täysin tiivis (läpiviennit, liitokset, tiivisteet), joten ylipaine huonetilassa purkaa kosteaa ilmaa ikkunan välitilaan aiheuttaen kondenssi-haitan kylmässä ulkolasipinnassa</li> <li>• ongelma korostuu korkean ilmankosteuden yhteydessä, joka nostaa myös ikkunoiden sisäpuolen kondenssiriskiä – ylipainetilanteessa korkea kosteustaso vaarantaa myös muita rakenteita</li> </ul> <p><b>Huonetilan kosteus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• lämmityskaudella kuiva ilma voi aiheuttaa hengitystieongelmia, kuitenkin liian korkea kosteustaso pakkaskautena lisää rakenteiden vaurioriskiä, samoin kondenssikosteus kylmissä rakennepinnoissa yleistyy – valinnassa on kyse miellyttävyyden ja rakenteiden välisestä kompromissista</li> <li>• jos kosteustasoa nostetaan, tulee myös automaattisella talo-/ohjaustekniikan avulla pystyä estämään ainakin kosteushuippuja mahdollisine kosteushaittoineen</li> <li>• onko talojen tiiveyskysymys otettu huomioon kaikki muut rakenteiden toimivuuteen vaikuttavat tekijät – kyse on uusien rakenneratkaisujen ja tekniikoiden muutoshallinnasta</li> </ul> <p><b>Ikkunan lähialueen kosteus- ja lämpöolosuhteet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ikkunan lasipinta ja eräät kohdat ikkunassa ovat pintalämpötiloiltaan sellaisia, että kondenssiriskin hallinta edellyttää riittävän turvallista kosteus-lämpötilasuhdetta; toisaalta olisi tutkittava, aiheuttavatko ikkunan kondenssiolosuhteet ongelmia/vaurioita myös muissa rakenteissa</li> <li>• kylmien ulkovaipan kohtien läheisyydessä kosteus-lämpötilasuhteen tulee olla sellainen, että ikkunoilla on toimintaedellytykset</li> <li>• ilmavuotojen vähentyminen lisää lämmön ohjaustarvetta myös ulkovaipan ja ikkunoiden läheisyyteen – näin, vaikka lämmön kokonaistarve muuten, paremmasta eristävydestä johtuen pienenee</li> <li>• huoneiston keskialueen lämmöntuottotekniikoissa ja mitoituksessa tulee ottaa huomioon myös ulkovaipan (ikkunat) lämmöntarve kondenssi-/kosteusriskin hallitsemiseksi</li> </ul>
---

*Taulukko 2. Ikkunoihin liittyviä ongelmia uudisrakentamisessa ja ongelmanratkaisuehdotuksia.*

<p><b>Ikkunoiden kastuminen rakennusaikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• puurakenteiden kastuminen tulisi rakentamisvaiheessa estää, asia tähdentyy kuivien sisustuksellisesti viimeistelyjen näkyvien puuosien yhteydessä</li> <li>• rakentamisen aikataulukilvoittelu väärissä kohdissa vaarantaa kosteuden hallinnan rakenteiden pitkäikäisyyden ja terveellisten sisäolosuhteiden kannalta</li> </ul> <p><b>Ikkunoiden asennusajankohta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• edelliseen kohtaan viitaten ikkunoiden oikea asennusajankohta on silloin, kun olosuhteet vastaavat liki lopullisia käyttöolosuhteita – tämä on eduksi myös ikkunoiden työn aikaisen mekaanisen vaurioitumisen välttämiseksi</li> </ul> <p><b>Ulkopinnan kondenssi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ikkunoiden eristävyttä tulee kehittää ja eristävyysvaatimukset ajoittaa muun ikkunateknologiakehityksen tahdissa ulkopuolen kondenssin tyyppisten haittailmiöiden välttämiseksi</li> </ul> <p><b>Ikkunoiden toimivuuden arviointi ja testaus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ikkunoiden arviointi valmiissa kohteessa on erittäin vaikea esimerkiksi kondenssiriskin monien vaikuttavien tekijöiden (toisistaan riippuvat olosuhdetekijät, rakennuksen monimuotoisuus ja epäyhdenäiset ominaisuudet) ja jatkuvasti muuttuvien ympäristöolosuhteiden hankaloittaessa tuoteosakohtaisten mittausten, selkeiden havaintojen ja perusteltujen johtopäätösten tekemistä</li> <li>• ongelmatapauksissa on usein kyse lyhytaikaisista tilanteista, joiden todentaminen jälkikäteen on vaikeaa – objektiivista selvitystä saattavat haitata myös osapuolten väliset intressiristiriidat</li> <li>• parhaiten ominaisuuksien mittaaminen tapahtuu laboratoriossa hallituissa, tarkoin ja kohtuullisin järjestelyin määritetyissä olosuhteissa</li> <li>• käsitys yleisistä ikkunarakenteiden toiminnallisista rajoista perustuu ja täydentyy käytettyjen ratkaisujen perusteella ja palautteesta käytännön eri olosuhteissa ja erilaisissa rakennuksissa</li> <li>• ikkunoiden toimivuuden hallinta ja ongelmien torjuminen liittyy jatkossa keskeisesti olosuhteisiin vaikuttavien talo- ja ohjaustekniseen kehitykseen ja käyttöönottoon</li> </ul>
--

## 2. Kondenssi ikkunan lasipintoihin

### 2.1. Kondenssi-ilmio

Ikkunan eri pintoihin voi ajoittain tiivistyä (kondensoitua) kosteutta. Kosteuden tiivistyminen ikkunan pintoihin on yleensä seurausta jostain viasta ja tiivistyminen on haitallista ikkunan kestävyydelle. Poikkeuksena on ulkolasin ulkopintaan tiivistyvä kosteus, joka on osoituksena ikkunan hyvästä lämmöneristävydestä eikä se vaikuta ikkunan kestävyysasteeseen. Taulukossa 3 on esitetty eri tiivistymiskohtamahdollisuudet ja tyypillisimmät syyt, joista kosteuden tiivistyminen kyseisiin kohtiin johtuu. Näitä syitä ja kosteuden tiivistymisen poistamista on tarkasteltu myös lähemmin.

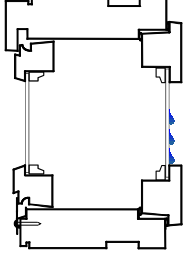
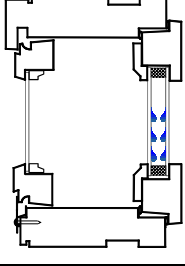
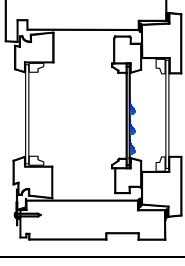
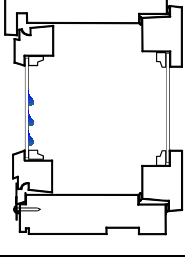
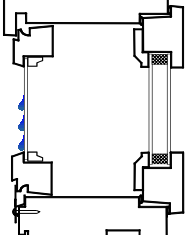
Ikkunan lasiosan lämmöneristävyys kasvaessa lämpövirta ikkunan läpi pienenee ja sen myötä ikkunan ulkopinnan lämpötila laskee. Tämän myötä riski ulkopinnan kondenssiin kasvaa. Kondenssin esiintymiselle lasiosan lämmöneristävyys on ratkaisevaa. Kondenssin esiintyminen ikkunan ulkopinnalla johtuu siitä, että uloimman lasin pintalämpötila alittaa ulkoilman kastepistelämpötilan (kuva 2).



Kuva 2. Ikkunoiden lasien ulkopintaan tiivistynyttä kosteutta.

Kondenssi aiheutuu siitä, että ikkunan ulkopinta säteilee ympäristöön ja taivaalle lämpöä eikä pilvetön taivas ulkoilmaa kylmempänä säteile ikkunaan päin niin paljon lämpöä kuin ikkuna säteilee pois päin. Tämän seurauksena ikkunan ulkopinta jäähtyy ulkoilmaa kylmemmäksi. Toinen tekijä, mikä aiheuttaa kondenssia ikkunoiden ulkopintoihin on ulkoilman lämpötilan nopea nousu kylmän ja kostean yön jälkeen. Tässä tilanteessa ikkunan lämpötila seuraa viiveellä ilman lämpötilaa ikkunan lämpökapasiteetin vuoksi. Jotta kondenssia esiintyisi, tuulen pitää olla vähäistä, ulkoilman lämpötilan nousta nopeasti ja ulkoilman olla hyvin kostea. Kun ikkunanlasiosan lämmöneristävyys paranee, uloimman lasin ulkopinnan kondenssin määrä ja esiintymiskerrat kasvavat. Selektiivilasilla varustetussa MSE-ikkunassa ulkopinnan kondenssia on pahimmilla alueilla joinain vuosina 10 - 20 kertaa vuodessa ja se ajoittuu loppukesään ja alkusyksyyn. Jos ikkunan lasiosa on nelilasinen, kondenssin esiintymisjakso pitenee ja määrä kasvaa. Ikkunan ulkopinta saattaa joskus olla täysin kondenssin peitossa, kondenssia voi esiintyä jopa pakkaskautena, jolloin se huurteena voi pysyä ikkunan ulkopinnalla epäedullisissa olosuhteissa muutaman päivän.

Taulukko 3. Ikkunan eri lasipintoihin tiivistyvän kosteuden syitä [1].

Tiivistymiskohta	Kosteuden tiivistymisen syy
	<p><b>Kosteutta sisäpinnassa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ikkunan lämmöneristävyys on huono</li> <li>• sisällä on poikkeuksellisen kosteaa</li> <li>• huonetilojen ilmanvaihto ei toimi kunnolla</li> <li>• ulkona on kova pakkanen</li> <li>• sisäpuutteen tiivisteet vuotavat kylmää ilmaa ikkunan läpi ulkoa sisälle</li> <li>• ilmankierto ikkunan sisäpinnalla on huonoa esimerkiksi ikkunalaudan, ikkunapielen tai sisäpinnalla olevien verhojen tai kaihtimien vuoksi</li> <li>• ikkunan alapuolella ei ole lämpöpatteria</li> </ul>
	<p><b>Kosteutta eristyslasin sisällä</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eristyslasin reunakittaus on vaurioitunut</li> <li>• asennusvirhe; eristyslasi on kannatettu vain toisesta lasista</li> <li>• valmistusmateriaalivirhe; eristyslasien kokoonpanossa käytettyjen massojen tartunta tai kovettuminen on puutteellista</li> <li>• eristyslasin valmistusvirhe; eristyslasin kokoonpanossa käytetyt massat eivät tartu kunnolla esimerkiksi likaisten pintojen vuoksi</li> </ul>
	<p><b>Kosteutta keskipuitteen lasissa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sisäpuutteen lasin kittaus tai puitteen nurkkaliitokset vuotavat ilmaa</li> <li>• vettä valuu seinän sisäpintaa pitkin tai seinän sisällä sisäpuutteen tai karmin päälle</li> </ul>
	<p><b>Kosteutta ulkolasin sisäpinnassa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sisäpuutteen tiiviste vuotaa ilmaa</li> <li>• ulkopuite on tiivistetty liian hyvin</li> <li>• vettä valuu seinän sisällä karmin yläosan päälle</li> <li>• ulkopuitteen lasituskittaus vuotaa sadevettä ulkolasin sisäpuolelle</li> <li>• sadevesi tai lumi pääsee tunkeutumaan karmin ja puitteen väliseen tilaan</li> <li>• ikkunan ulkopuolella olevalle vesipellille on kinostunut lunta, mikä haittaa puitteiden välisen tilan tuulettumista</li> <li>• rakoja sisäpuutteen tai karmin liitoksissa</li> </ul>
	<p><b>Kosteutta ulkolasin ulkopinnassa (seurausta hyvästä lämmöneristyksestä)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ikkunan lämmöneristävyys on hyvä</li> <li>• ulkona on yöllä kosteaa, tyyntä, pilvetöntä ja suhteellisen lämmintä</li> <li>• ulkoilman lämpötila kohoaa nopeasti yön jälkeen ja ulkona on tyyntä ja kosteaa</li> </ul> <p>HUOMAA, että kosteuden tiivistyminen ikkunan ulkopintaan ei ole vika, joka vaatii korjaamista, vaan osoitus ikkunan hyvästä lämmöneristävyydestä ja poikkeuksellisista olosuhteista. Ikkuna kestää tiivistymisen ulkopintaan samalla tavalla kuin sateenkin.</p>

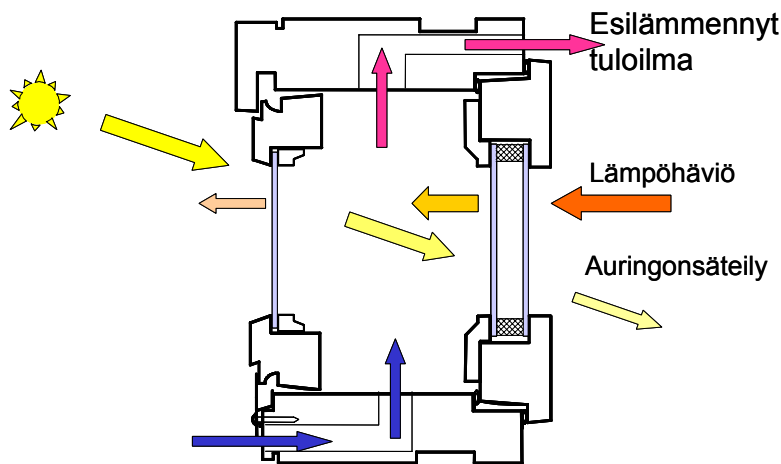
### 3. Tuloilmaikkunan toimivuuden arviointi – case 1

Tuloilmaikkuna on esimerkki ikkunasovelluksesta, jonka toimivuus vaikuttaa voimakkaasti ilmanvaihdoin ja sisäilmaston toimivuuteen. Tuloilmaikkunan käyttökohteet vaativat jatkuvasti alipaineisen rakennuksen ja sitä käytetään koneellisen poistoilmanvaihdon järjestelmien yhteydessä. Tämä ikkunatyyppe tuo poistoilmanvaihtojärjestelmän toimivuuteen erityispiirteitä, joilla toteutus on joissakin tapauksissa kilpailukykyinen vaihtoehto koneellisen tulo- ja

poistoilmanvaihdon kanssa. Ulkoilman sisäänjohtaminen ja integrointi ikkunaan on erittäin kustannustehokas ja yksinkertaistettu ratkaisu korjausrakentamisessa erityisesti, kun yhdistetään ikkuna- ja ilmanvaihtosaneeraus. Tuloilmaikkunan käyttöön liittyy riskejä, jotka tulee tiedostaa ja minimoida mm. suunnittelun, asennuksen, käytön ja huollon ohjeistuksen avulla.

Tuloilmaikkunan käyttöön liittyviä riskejä voidaan arvioida yleisellä riskienarviolla, jonka elementtejä ovat: 1) kohteen määrittely, 2) vaarojen tunnistaminen, 3) seurausten arviointi, 3) todennäköisyyksien arviointi, 4) kokonaisriskin arviointi sekä 5) riskin vähentäminen ja ehkäisy.

Seuraavassa analyysin kohteena on tuloilmaikkuna (kuva 3, [2]), joka on osa rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää. Tuloilmaikkunan kautta tuodaan rakennukseen raitista tuloilmaa. Taulukossa 4 sovelletaan riskienarviointimenettelyä, jossa listataan ikkunatyypin mahdolliset riskit ja niiden seurannaisvaikutukset ja esitetään ehdotus, millä kyseinen riski minimoidaan ja/tai syy korjataan. Riskienarviointitaulukkoa voidaan myös täydentää numeroarviointina, jolloin riskitekijöille annetaan painoarvot riskin vakavuuden, esiintymistodennäköisyyden ja havaitsemistodennäköisyyden perusteella. Kokonaisriskiä indikoiva lukuarvo (RPN) saadaan näiden tekijöiden kertolaskuna [3]. Riskienarviointitaulukkoa voidaan hyödyntää huollon ja käytön ohjeistuksessa, kuntoarvion teossa sekä sisäilmasto- ja vaurioselvityksissä.



Kuva 3. Tuloilmaikkunan periaate. Ilma johdetaan puitteiden väliin ulkopuitteen alareunasta tai sivusta. Ilma voidaan suodattaa. Tuloilmasuihku ohjataan huonetilassa tyypillisesti kattoa kohti, jotta ei synny vetoa oleskeluvyöhykkeellä.

## 4. Ikkunan toimivuuden arviointi kenttäolosuhteissa – case 2

### 4.1. Ikkunoiden toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä

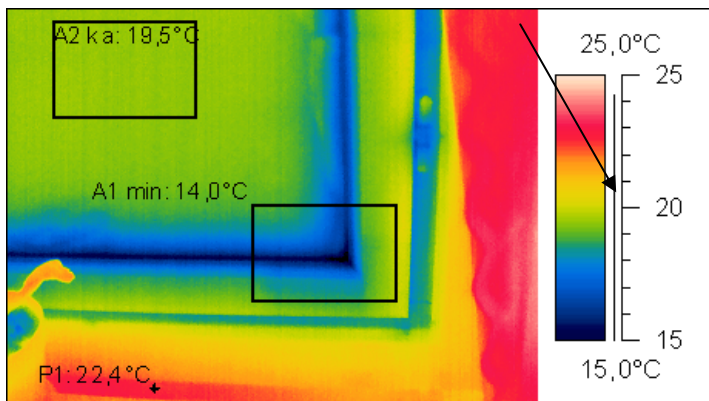
Ikkunoiden toimivuus tarkistetaan yleisimmin silmämääräisesti. Mikäli se ei anna riittävän luotettavaa kuvaa toimivuudesta, voidaan tehdä sisäpuolisen lämpökuvaus ja tiiviysmittaus, joka osoittaa ikkunan lämpöhäviöt ja ilmavuodot. Yleisin ongelma on ollut asennusvirhe, joka havaitaan lämpökuvissa selvästi. Eristyslasi-ikkunoiden sisäpinnassa voidaan havaita kapea, muuta ikkunapintaa selvästi kylmempi rakenteellisesta kylmäsillasta johtuva nauha joka rajoittuu ikkunapuitteeseen (kuva 4). Tämä on tyypillistä, eikä sinänsä ole vika.

Taulukko 4. Tuloilmaikkunan käyttöön liittyvien riskien arviointi ja keinot minimoida riskejä.

Vaarojen tunnistaminen / ilmiöt, joilla havainnoidaan riskejä	Mahdollisia aiheuttajia	Mahdolliset seuraukset	Riskin vähentäminen ja ehkäisy
Ikkunan sisäpinta on liian kylmä	<ul style="list-style-type: none"> <li>eristyslasin huono lämmöneristävyys</li> <li>ilmavuoto puitteessa</li> <li>liian suuri ilmavirta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kondenssi lasin sisäpinnalla =&gt; puitteen vaurioituminen; halkeamat, maalivauriot</li> <li>kylmäsaiteilyä ja vedon tunnetta ikkunan lähellä =&gt; huonontunut lämpöviihtisyys</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>valitaan sisäpuutteeseen paremman lämmöneristävyyden eristyslasi</li> <li>tarkistetaan, ettei ilmavirta ole liian suuri</li> <li>tarkistetaan alipaineen toteutuminen (liian suuri alipaine johtaa liian suureen ilmavirtaan)</li> </ul>
Tuloilmavirta ei ole riittävän suuri tai se vaihtelee	<ul style="list-style-type: none"> <li>poistoilmahuoneen tuottama alipaine ei ole riittävän suuri</li> <li>poistopuhallin ei toimi</li> <li>puhallin ja poistokanavisto on mitoitettu väärin</li> <li>rakennuksen vaippa ei ole riittävän tiivis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ilmavirta on liian pieni, eikä täytä ilmanvaihtovaatimuksia</li> <li>hallitun tuloilmareitin kautta ei saada riittävästi raitista ja puhdasta ilmaa</li> <li>ilma tulee hallitsemattomien reittien kautta, jolloin sitä ei suodateta =&gt; ilman ja pintojen likaantuminen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tarkistetaan, että puhallin pyörii</li> <li>tarkistetaan rakennuksen alipaineisuus</li> <li>tarkistetaan tuloilmamäärä</li> <li>tarkistetaan rakennuksen tiiviys (ilmanvuotoluku) ja verrataan suunnitelmiin</li> <li>tarvittaessa perussäädetään ilmanvaihto</li> <li>tarvittaessa tiivistetään rakennuksen vaippaa</li> </ul>
Ilma virtaa rakennuksesta ikkunaan päin aiheuttaen kondenssia rakenteen sisälle	<ul style="list-style-type: none"> <li>ks. ed kohta</li> <li>sisäpuitteen tiiviste vuotaa</li> <li>takaisinvirtauksen estävä läppä tai muu mekanismi ei toimi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ks. ed. kohta</li> <li>kondenssi rakenteen sisälle =&gt;</li> <li>halkeamat ja maalivauriot</li> <li>visuaalinen haitta (kondenssi ja jäätyminen)</li> <li>- liian tarttumisen kondenssiin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ks. edellinen kohta</li> <li>tarkistetaan takaisinvirtauksen eston mekanismin toimivuus</li> <li>tarkistetaan sisäpuitteen tiivisteiden kunto</li> </ul>
Epätiivis ulkopuute	<ul style="list-style-type: none"> <li>tiiviste asennettu huonosti</li> <li>tiiviste vanhentunut ja menettänyt elastisuutensa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ilma ei tule puitteiden väliin suunniteltua reittiä ja ilman esilämpeneminen ei ole tehokasta</li> <li>vesivuodot</li> <li>lumen tunkeutuminen rakenteeseen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tarkistetaan tiivisteiden kunto ja tarvittaessa vaihdetaan</li> </ul>

Havaitut kondenssitapaukset keskittyvät juuri ikkunan alareunaan. Ikkunassa mahdollisesti esiintyvän kondenssin syitä – mikäli ikkunan asennus ja ikkunan toimivuus on ollut asianmukaista – joudutaan etsimään myös muista, sisäolosuhteista johtuvista tekijöistä. Kaikki aikaisemmin kappaleessa 1 esitetyt tekijät vaikuttavat pintalämpötiloihin. Ikkunan lämpötekninen toimivuus sekä sisäolosuhteiden vaikutus pitäisi pystyä erottamaan toisistaan.

Nykyrakentamisessa suositetaan isoja ikkunapinta-aloja sekä lattialämmitystä. Lattialämmityksen pintalämpötila ikkunoiden alla on käytännössä jopa 30 °C matalampi kuin vesikiertoisen lämmityspatterin pintalämpötila.



Kuva 4. Tyypillinen MSE-ikkunan lämpökuva.

Ikkunan pinnan lähellä nouseva lämmin ilmavirtaus jäähtyy ja kääntyy alaspäin pudoten lattialle mahdollisesti aiheuttaen vetoa. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmän tasapainotus ei ole kohdallaan (liian suuri alipaine) ja ikkunarakenteessa/ulkoseinärakenteessa on vuotoja, sisään virtaava kylmä ulkoilma aiheuttaa vetoa ja pintojen jäähtymistä. Myös ikkunan pintalämpötila ulkoseinään verrattuna on muuta seinärakennetta matalampi. Tämä voi aiheuttaa säteilyvetoa (erityisesti jos ikkunan lähellä työskennellään). Ilmavuodot ja matalat pintalämpötilat vielä alentavat lämpöviihtyvyyttä. Käytössä olevien ohjeistojen [4] perusteella voidaan arvioida suuntaa antavasti ikkunoista johtuvaa ilman virtausnopeutta. Erilaisten mallintamis- ja simulointiohjelmien avulla voidaan arvioida eri tekijöiden vaikutusta sisäolosuhteisiin perusteellisemminkin.

#### 4.2. Ikkunoiden toimivuuden mittaus

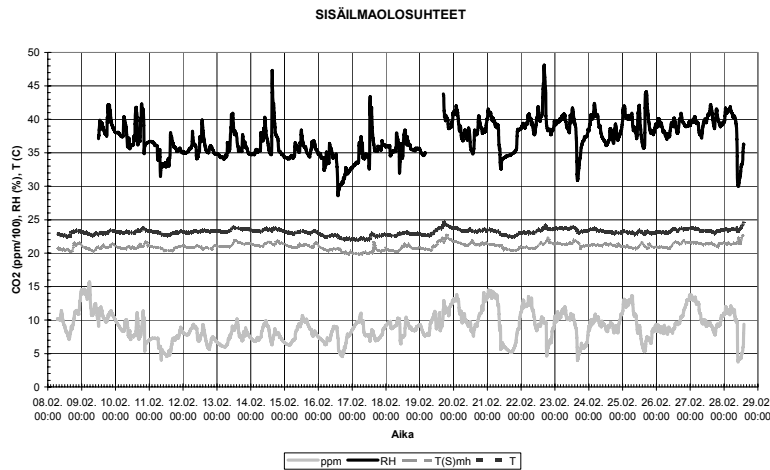
Sisäolosuhteiden mittaus ja erityisesti ikkunoiden toimivuuden mittaus kenttäolosuhteissa ei kuitenkaan ole yksinkertaista. Seuraavassa esitetään tapaus, jonka lähtökohtana oli asiakkaan ilmoittama omakotitalon ikkunakondenssi. Ikkunat ovat toisinaan huurtuneet sisäpuolelta. Kohteessa suoritettiin kahden lämmityskauden aikana toimivuusmittauksia. Ensimmäinen mittausjakso oli lyhyt, ja ulkolämpötila suhteellisen korkea. Toisella mittausjaksolla kohteessa seurattiin kahden huoneen (olohuone ja makuuhuone) ikkunan pintalämpötiloja, lämpövirtoja ja sisäilman ominaisuuksia n. kolmen viikon ajan. Mittausjakso valittiin riittävän pitkäksi sen vuoksi, että jaksolle saataisiin myös kylmiä jaksoja sekä ulkolämpötilan vaihteluita. Kohteessa oli vesikiertoinen öljykeskuslämmitys sekä osassa ikkunoissa ulkoilmaventtiilit ja ilmanvaihto hoidettiin liesituulettimen avulla. Lisäksi kosteissa tiloissa oli poistoilmaventtiilit.

Mitattavat suureet olivat:

- ikkunoiden keskiosan pintalämpötila
- ikkunoiden alareunan ja tuuletusluukun alareunan pintalämpötilat
- lämpövirrat pintalämpötilamittausten läheisyydessä
- sisäilman lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus ikkunan läheisyydessä
- sisäilman suhteellinen kosteus ikkunan läheisyydessä
- tuloilman lämpötila ulkoilmaventtiilistä
- ulkoilman lämpötila
- lämmityspatterin menoveden lämpötila
- eristyslasiosan ja ulkolasin välin lämpötila tuuletusluukussa
- ulko- ja sisätilan paine-ero

Kohteessa tehtiin ikkunoiden lämpökuvaus sisä- ja ulkopuolelta. Kohteen ilmavuotoluku  $n_{50}$  ja liesituulettimen sekä poistoventtiilien sekä ulkoilmaventtiilien ilmavirrat oli mitattu aikaisemmin.

Kuvassa 5 on esitetty toisen mitatun huoneen sisäolosuhteet. Tilat olivat keskimäärin -7 Pa alipaineisia ulkoilmaan verrattuna. Tämän tilan keskimääräinen CO<sub>2</sub>-pitoisuus oli n. 920 ppm. Mittausjakson aikainen suhteellinen kosteus on melko korkea ajankohtaan nähden, keskimäärin 37 %. Suhteellinen kosteus ylittää 40 % todennäköisimmin ruuanlaitto- ja tiskausaikoina (max 48 %), yleisimmin iltopäivisin. CO<sub>2</sub>-pitoisuuden kasvu ja huiput sijoittuvat yöajalle.



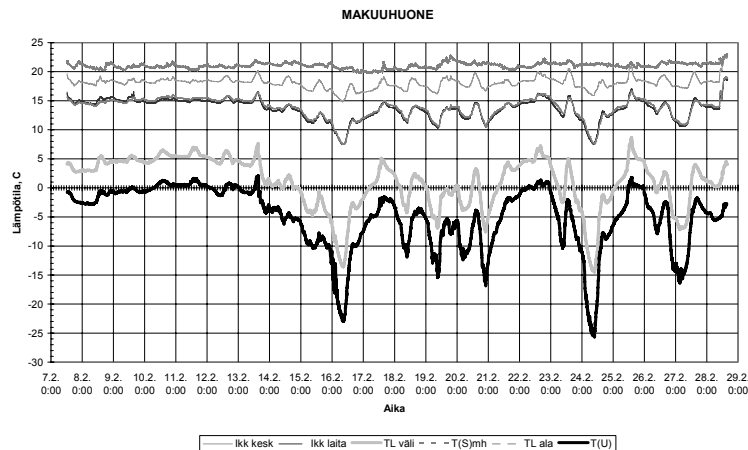
Kuva 5. Sisäilmaolosuhteet (CO<sub>2</sub>, ppm/1000 (alin käyrä), suhteellinen kosteus RH, %, ylin käyrä ja huonelämpötilat T(S), T ikkunan edestä sekä huoneesta mitattuna).

Kuvassa 6 on esitetty mitatun huoneen ikkunan pintalämpötiloja. Ulkolämpötila oli matalimmillaan -25,7 °C. Ikkunan matalimmat pintalämpötilat olivat 7,5 °C.

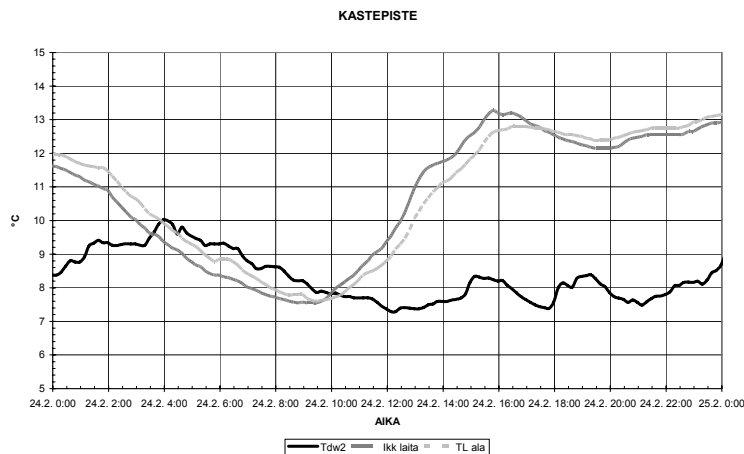
Kastepisteolosuhteet ikkunan ja tuuletusluukun alareunassa alitettiin kylmimpänä ajanjaksona (ulkoilman lämpötila laski -20 °C:ta n. -26 °C:een n. 6,5 h aikana (kuva 7). Kuvassa 8 on esitetty makuuhuoneen patterin pintalämpötila, kun ulkolämpötila oli matalimmillaan (min n. -26 °C). Patterin yläosan lämpötilan korkein arvo vaihtelee 35 °C:n ja 38 °C:n välillä. Patteritermostaatti on auki n. 15 min ja kiinni n. 2 h. Patteriverkoston lämpötilan säätö värähtelee. Yleensä värähtelyn syynä voi olla liian korkea menoveden lämpötila, liian suuri vesivirta tai molemmat. Termostaattiventtiilin yli voi olla liian suuri paine-ero, verkosto voi olla perussäätämättä tai säätöarvot ovat väärät.

Mitattujen ja laskettujen tulosten perusteella esim. ulkolämpötilassa -27 °C ikkunan reunan mittauspisteen laskennallinen pintalämpötila on 6,6 °C. Sisälämpötilassa 23 °C, kun suhteellinen kosteus on 35 %, kastepistelämpötila on 6,7 °C. Jos käytetään mitattua suurinta suhteellisen kosteuden arvoa 48 % (suhteellinen kosteus nousi todennäköisimmin silloin kun keittiössä käytetään vettä), ja sisälämpötila on edelleen 23 °C, kastepistelämpötila on n. 11,5 °C. Laskennallisesti mittaustuloksista lasketun regressiosuoran perusteella ulkolämpötilan ollessa n. -12 °C matalin ikkunan pintalämpötila on n. 11,5 °C. Kohteessa sisäilman suhteellinen kosteus mittausjakson aikana oli verrattain korkea (keskimäärin 37 %, ajoittain > 40 %). Mikäli suhteellinen kosteus pysyisi < 35 %:n tasolla ja huoneilman lämpötila ei ylittäisi 25 °C:ta, laskennallisesti kondensoitumista ikkunaan alkaisi esiintyä vasta kun ulkoilman lämpötila laskee alle -20 °C. Ikkunoissa ei havaittu mittauksiin ja lämpökuvauksen perustuen merkittäviä toiminnallisia puutteita. Seurantamittausten perusteella ulkoilman lämpötila laskiessa -25 °C:n tasolle, mitattujen ikkunoiden alareunan matalimmat pintalämpötilat ovat noin 7 °C – 8 °C, pintalämpötilaindeksillä TI [5] esitettynä vastaa pintalämpötilaindeksin arvoa 70 % - 72 %.



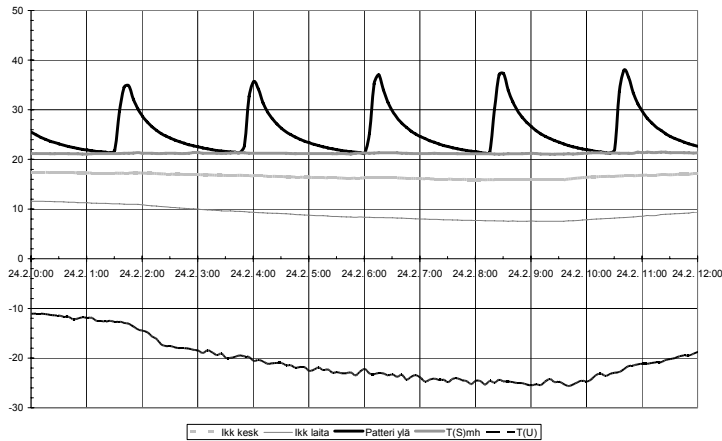


Kuva 6. Tutkitun huoneen ja ikkunan lämpötiloja. Ikk kesk = ikkunan keskiosa (toiseksi ylin), Ikk laita = ikkunan alanurkka (kolmanneksi ylin), TL väli = tuuletusluukun väliosan lämpötila, TL ala = tuuletusluukun alareunan lämpötila, T(S) sisälämpötila (ylin) ja T(U) = ulkolämpötila (alin).



Kuva 7. Makuuhuoneen ikkunan pintalämpötilat sekä kastepistelämpötilat kylmimpänä ajanjaksona. Alin käyrä Tdw2 = laskennallinen kastepistelämpötila, Ikk laita (toiseksi ylin) = ikkunan oikean alareunan mittauspisteen pintalämpötila, TL ala (ylin) = ikkunan tuuletusluukun alareunan mittauspisteen pintalämpötila.

Kolmen viikon mittausjakson aikana havaittiin vain yksi n. 6,5 h mittainen jakso (kuva 7), jolloin makuuhuoneen tuuletusluukun alareunan ja ikkunan alareunan pintalämpötila oli laskennallisen kastepisteen alapuolella. Tällöin ulkoilman lämpötila oli matalimmillaan n. -26 °C ja kyseinen jakso oli mittausjakson kylmin. Kondensoituminen on ollut mahdollista myös korkeammissa ulkolämpötiloissa olosuhteissa, joissa huonelämpötila on ollut korkeahko ja sisäilman suhteellinen kosteus on ollut erittäin suuri, huomattavasti normaalia talvisaikaista suhteellista kosteutta korkeampi. Huoneilman kosteus voi nousta korkeaksi vain siinä tapauksessa että kosteuskuormitus on ollut erittäin suuri ja/tai ilmanvaihdon toimivuus on ollut puutteellista. Mikäli ilmanvaihto toimii määräysten mukaisella tasolla, ongelmia ei todennäköisesti olisi ilmennyt tai ne olisivat lievempiä kuin oli kuvattu. Esimerkissä kuvattua kondenssiongelmaa ei voitu mittauksin todentaa. Ikkunoiden tarkka toimivuus voitaisiin selvittää parhaiten kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa. Näitä tuloksia voitaisiin verrata kenttäolosuhteissa tehtyihin mittauksiin. Edellä esitetty esimerkki osoittaa, kenttäolosuhteissa tehdyt mittaukset ovat hankalia toteuttaa - jokainen tapaus on omanlaisensa joka asettaa mittauksille suuria vaatimuksia. Myös käyttäjän rooli on tärkeä.



Kuva 8. Makuuhuoneen patterin yläosan pintalämpötila kylmimmän ajanjakson aikana (ylin käyrä). Ulkolämpötila = alin käyrä.

## 5. Yhteenveto

Ikkunoiden toimivuuteen liittyviä ilmiöitä pitää tulkita oikein. Ikkunoiden puutteellinen toimivuus voi johtua ikkunoista sekä olosuhteista. Ikkunakorjausten ohjeistuksessa tulisikin korostaa ilmanvaihdon tarkistusta/parannusta sekä patteriverkoston perussäätöä, jotta koko järjestelmä saataisiin kuntoon. Ikkunoiden toimivuuden kenttäolosuhteisiin soveltuvia mittaamenetelmiä ja ohjeistusta tulee kehittää. Riskienhallintamenetelmiä voidaan käyttää jo suunnitteluvaiheessa, jossa mahdolliset syyt ja ilmiöt listataan, kuvataan seurannaisvaikutukset sekä esitetään keinot, joilla riskit minimoidaan ja/tai syy korjataan. Riskienarviointitaulukkoa voidaan hyödyntää huollon ja käytön ohjeistuksessa, kuntoarvion teossa sekä sisäilma- ja vaurioselvityksissä. Esimerkissä osoitettiin, että ikkunan toimivuustarkastelussa kenttäolosuhteissa täytyy ottaa huomioon kohteen käyttöolosuhteet sekä lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän toimivuus, joista voi aiheutua toimivuuteen vaikuttavia ilmiöitä. Toisinaan nämä ilmiöt koetaan ikkunaan liittyviksi ongelmiksi, vaikka kyseessä on ilmanvaihtoon tai muun järjestelmän toimivuuteen liittyvä ongelma.

## Lähdeluettelo

- [1] Hemmilä, Kari; Saarni, Risto, Ikkunaremontti. Rakennustieto Oy. Helsinki (2002), 115 s.
- [2] Heimonen, Ismo & Hemmilä, Kari. Tuloilmaikkunan energiatehokkuus. Espoo 2006. VTT Tiedotteita 2329. 65 s. + liitt. 41 s.
- [3] Heimonen, Ismo; Immonen, Iiro; Kauppinen, Timo; Nyman, Mikko; Junnonen, Juha-Matti. 2007. Risk management for planning and use of building service systems. CLIMA 2007 Well being Indoors, 9th REHVA World Congress, 10-14 June 2007, Helsinki. Proceedings, Vol. 3. FINVAC ry, ss. 485-494
- [4] LVI-ohjetiedosto LVI 05-10235. Sisäilmasuunnittelu (1995) 19 s. Rakennustieto 1995.
- [5] Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriö. Oppaita 2003-1. ISBN 952-00-1301-6. Helsinki 2003.

# Ikkunoiden toiminnalliset vaatimukset ja niiden toteuttamisen keinot – kuinka toteutetaan hyvä lämmöneristävyys ja ilman- ja sateenpitävyys?

Ismo Heimonen, Kari Hemmilä ja Pekka Sipari  
VTT

## Tiivistelmä

Tässä käsitellään ikkunoiden lämmöneristävyiden, sateenpitävyyden ja ilmanpitävyyden osalta määräykset, ohjeet, vaatimukset ja vaatimusluokittelut Suomessa sekä hyvän rakennustavan asettamat vaatimukset ikkunoille, käytettävät testaus- ja laskentamenetelmät, ominaisuuksien nykytila suomalaisissa ikkunoissa sekä konkreettiset keinot parantaa ikkunoiden em. ominaisuuksia

Paperissa esitetään, kuinka määräysten mukainen ikkunoiden lämmönläpäisykerroin on toteutettavissa erilaisilla karmi- ja puiterakenteilla, lasivaihtoehdoilla (lasien lukumäärä, selektiivilasien vaihtoehdot) ja eristyslasiteknikalla (2K, 3K, dimensioiden vaikutukset sekä täytekaasujen vaikutukset). Lisäksi esitetään keinot lämmöneristävyiden parantamiseksi alle määräysten minimitasoon.

Ilman- ja sateenpitävyyteen vaikutetaan karmi- ja puiterakenteen dimensioilla ja detaljeilla, tiivisteiden tyypillä ja lukumäärällä, vedenpoistoreikien /urien suunnittelulla, lukkojen tyypillä ja sijoittelulla, karmien ja puitteiden kyntesyvyyksillä, ikkunan koolla ja muodolla ja mitta- ja muototarkkuustekijöillä.

## 1. Johdanto

Suomessa Rakentamismääräykset määrittelevät ikkunoiden ominaisuuksia koskevat minimiarvot, joita uudisrakentamisessa tulee noudattaa. Seuraavissa Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMk) osissa on esitetty rakennuksen ikkunoihin liittyviä suunnittelumääräyksiä ja -ohjeita, jotka koskevat uudisrakentamista:

- C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Määräykset ja ohjeet 1998
- C3 Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset 2010
- C4 Lämmöneristys. Ohjeet 2003
- D3 Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2010
- E1 Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002
- F2 Rakennuksen käyttöturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2001
- G1 Asuntosuunnittelu. Määräykset ja ohjeet 2005

Standardeissa on esitelty menetelmät ikkunoiden teknisten ominaisuuksien määrittämiseksi ja ikkunoiden luokittelemiseksi ominaisuuksien perusteella. Ikkunoiden Eurooppalainen tuotestandardi EN14351-1 [1] määrittelee ikkunan ominaisuudet, joille voidaan asettaa vaatimuksia valittaessa käyttötarkoitukseen sopivaa ikkunatyyppiä kohteeseen. Mahdollisia ominaisuuksia on listattu standardissa 23 kpl, joista kaikki eivät ole oleellisia normaaleissa käyttökohteissa. Keskeisiä ja usein vaadittuja ominaisuuksia ovat:

- lämmöneristävyys,
- sateenpitävyys,
- ilmanpitävyys,
- tuulenpaineenkestävyys,
- äänitekniset ominaisuudet ja
- palo-ominaisuudet; palonkestävyys

Tuotestandardi määrittelee myös testaus- ja laskentamenetelmät, joilla ominaisuudet määritellään, sekä joidenkin ominaisuuksien osalta ominaisuuksien luokat.

RT-kortit ja muut vastaavat opastavat ikkunoiden valmistamista, asentamista laadun toteamista ja huoltamista. Nämä kaikki ohjeet määrittelevät yhdessä niin sanotun hyvän rakentamistavan.

## 2. Ikkunoiden tuotestandardin määrittelemät keskeiset ominaisuudet ja niiden todentaminen

Ikkunoiden ja muiden rakennustuotteiden tuotestandardi pohjautuu EU:n rakennustuote-direktiiviin, minkä tarkoituksena on parantaa eurooppalaisten rakennustuotteiden kilpailukykyä avaamalla sisämarkkinat CE-merkityille rakennustuotteille. Tuotestandardissa on kuvattu ne testi-, laskenta-, luokitus- ja vaatimusstandardit, joita käytetään CE-merkittyjen tuotteiden ominaisuuksien kuvaamisessa. CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa, että ikkuna täyttää kaikki tuotestandardin asettamat vaatimukset ja näin ollen ikkunaa voi viedä vapaasti maasta toiseen EU:n sisällä. Ikkunoiden tuotestandardi ei kuitenkaan sisällä mitään ominaisuuksien vaatimustasoja, vaan se kuvaa standardit, joilla ominaisuuksia määritetään ja luokitellaan. Kansallisissa rakentamismääräyksissä on esitetty joillekin ominaisuuksille vähimmäisarvoja.

Tuotestandardi koostuu vapaaehtoisesta osasta ja ZA liitteessä kuvatusta harmonisoidusta osasta. Tässä harmonisoidussa osassa määriteltyjä testi- ja luokitusstandardeja (taulukko 1) on noudatettava, jotta ikkuna voidaan merkitä CE-tunnuksella. Ikkunoiden tuotestandardissa EN14351-1 ikkunoiden tekniset ominaisuudet on jaettu harmonisoituihin ominaisuuksiin ja muihin. Harmonisoidut ominaisuudet ovat sellaisia, joille viranomaiset voivat esittää kansallisia vaatimuksia esimerkiksi rakentamismääräyksissä. Ikkunoiden CE-merkinnässä ikkunavalmistaja merkitsee ikkunoihin Suomessa pakollisen lämmönläpäisykerroimen lisäksi ne harmonisoidut ominaisuudet, jotka se haluaa esittää.

Taulukossa 3 on esitetty ne harmonisoidut ominaisuudet, jotka koskevat tavallisia ulkoseinän ikkunoita. Lisäksi siinä on esitetty eri luokat ja niitä vastaavat raja-arvot. Kaikille niille ominaisuuksille, joita ei ole määritelty rakentamismääräyksissä, ei tarvitse aina määrittää eikä esittää luokittelua, vaan ne voidaan merkitä ”npd”.

Taulukko 1. Harmonisoitujen ominaisuuksien testi-, laskenta- ja luokittelustandardit.

Ominaisuus	Luokittelustandardi	Testi- / laskentastandardi
Palo-ominaisuudet; palonkestävyys	EN 13501-1	EN 13501-1
Ilmanpitävyys	EN 12207	EN 1026
Sateenpitävyys	EN 12208	EN 1027
Tuulenpaineen kestävyys	EN 12210	EN 12211
Turvalaitteiden kestävyys		EN 14609
Äänitekniset ominaisuudet		EN ISO 140-3, EN ISO 717-1
Lämmönläpäisykerroin		EN ISO 10077-1, EN ISO 10077-2, EN ISO 12567-1

Taulukko 2. Muiden ominaisuuksien testi-, laskenta- ja luokittelustandardit.

Ominaisuus	Luokittelustandardi	Testi- ja laskentastandardi
Iskunkestävyys	EN 13049	EN 13049
Auringonsäteilyn ja valon läpäisy		EN 410, EN 13363-1, EN 13363-2
Avausvoimat	EN 13115	EN 12046-1
Mekaaninen lujuus	EN 13115	EN 14608, EN 14609
Ilmanvaihto		EN 13141-1
Luodinkestävyys	EN 1522	EN 1523
Räjähdyksen kestävyys	EN 13123-1, EN 13123-2	EN 13124-1, EN 13124-2
Toistuvan avaamisen ja sulkemisen kestävyys	EN 1191	EN 12400
Käyttäytyminen eri ilmaolosuhteiden välissä		ENV 13420
Murronkestävyys	EN 1627	EN 1628, EN 1629, EN 1630

Taulukko 3. Ikkunoiden tuotestandardissa SFS-EN 14351-1 esitetyt harmonisoidut ominaisuudet ja niiden luokittelu.

Ominaisuus	Luokittelu / arvo	
Lämmönläpäisykerroin	npd	Ilmoitettu arvo
Ilmanpitävyys	npd	1 (150 Pa), 2 (300 Pa), 3 (450 Pa), 4 (600 Pa)
Sateenpitävyys	npd	1A (0 Pa), 2A (50 Pa), 3A (100 Pa), 4A (150 Pa), 5A (200 Pa), 6A (250 Pa), 7A (300 Pa), 8A (450 Pa), 9A (600 Pa), Exxx (>600 Pa)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei suojattu (A)</li> <li>• Suojattu (B)</li> </ul>		1B (0 Pa), 2B (50 Pa), 3B (100 Pa), 4B (150 Pa), 5B (200 Pa), 6B (250 Pa), 7B (300 Pa)
Tuulenpaineenkestävyy s	npd	1 (400 Pa), 2 (800 Pa), 3 (1200 Pa), 4 (1600 Pa), 5 (2000 Pa) Exxxx (>2000 Pa)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testauspaine (Pa)</li> <li>• Puitteen poikkeama</li> </ul>		A (1/150), B (1/200), C (1/300)
Äänitekniset ominaisuudet	npd	Ilmoitetut arvot
Palo-ominaisuudet; palonkestävyys	npd	F, E, D, C, B, A2, A1 ks EN 13501-5
Turvalaitteiden kestävyys	npd	Kynnysarvo

Tuotestandardin mukaan ikkunoiden mitattuja tai laskettuja ominaisuuksia voidaan soveltaa muun kokoisiin samanlaisiin ikkunoihin taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. Määritetyn arvon sovellettavuus muun kokoisiin ikkunoihin (SFS-EN 14351-1).

Ominaisuus	Määrittämyskoko	Soveltuva kokoalue
Lämmönläpäisykerroin	1,23 m ( $\pm 25\%$ ) x 1,48 m ( $-25\%$ ) 1,48 m ( $+25\%$ ) x 2,18 m ( $\pm 25\%$ )	Kokonaispinta-ala < 2,3 m <sup>2</sup> Kokonaispinta-ala > 2,3 m <sup>2</sup>
Ilmanpitävyys	ei määritelty	-100 ... +50 % testatun ikkunan kokonaispinta-alasta
Sateenpitävyys	ei määritelty	-100 ... +50 % testatun ikkunan kokonaispinta-alasta
Tuulenpaineenkestävyy s	ei määritelty	-100 ... 0 % testatun ikkunan leveydestä ja korkeudesta
Äänitekniset ominaisuudet	1,23 m x 1,48 m	ekstrapoloitavissa 4,6 m <sup>2</sup> kokoon asti
Turvalaitteiden kestävyys	ei määritelty	-100 ... 0 % testatun ikkunan kokonaispinta-alasta

### 3. Lämmöneristävyys

Ikkunoiden lämmöneristävyyttä kuvaa lämmönläpäisykerroin (U-arvo, W/m<sup>2</sup>K) joka ilmaisee, kuinka paljon rakenteen läpi menee lämpövirtaa, kun lämpötilaero rakenteen yli on 1 °C (1 K). Lämpöhäviön määrälle lämmityskaudella saadaan arvio kertomalla U-arvo lämmityksen astepäiväluvulla ja ikkunoiden pinta-alalla. Ikkunan energiatehokkuuteen vaikuttavat myös aurinkoenergian hyödyntäminen ja ilmanpitävyys. Auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin, g-arvo (%), ilmaisee kuinka hyvin ikkuna hyödyntää auringon säteilyenergiaa. Ilmanvuotoluku L (m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>) ilmaisee ikkunan läpi menevän vuotoilmavirran testauspaineessa 50 Pa.

Ikkunan energiatehokkuutta Suomen ilmastossa voidaan arvioida Energiaikkuna-luokituksen [2] kaavalla

$$E=140 * U - 160 * g + 50 L \quad (1)$$

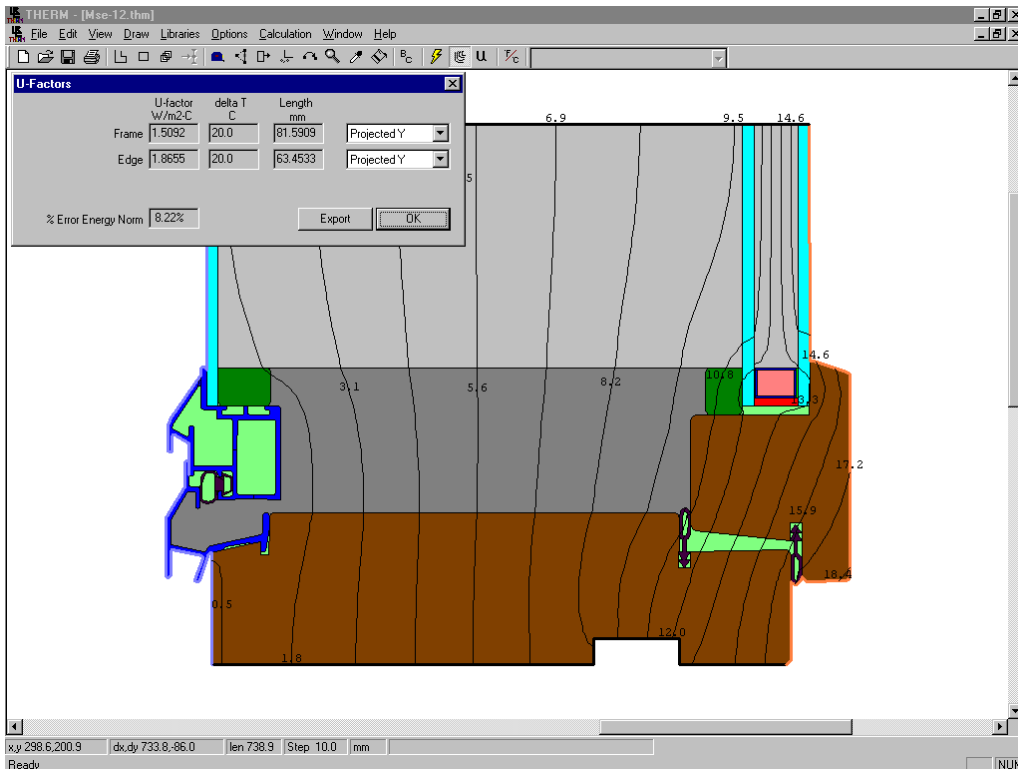
RakMk osa C3 [3] määrittelee ikkunan lämmönläpäisykertoimelle enimmäisarvon ja vertailuarvon. Vuoden 2010 määräyksissä lämmönläpäisykertoimen enimmäisarvo on 1,8 W/m<sup>2</sup>K ja vertailuarvo on 1,0 W/m<sup>2</sup>K. Lisäksi ikkunapinta-alalle on esitetty vertailuarvo, joka vuoden 2010 määräyksissä on määriteltä siten, että rakennuksen yhteenlasketun ikkunapinta-alan vertailuarvo on 15 % rakennuksen kokonaan tai osittain maanpäällisten kerrosten kerrostasojen summasta, mutta kuitenkin enintään 50 % rakennuksen julkisivupinta-alasta. Rakennuksen vaipan lämpöhäviö saa olla enintään yhtä suuri kuin määräyksissä esitetyillä vertailuarvoilla laskettu rakennuksen vaipan lämpöhäviö.

#### 3.1 Testaus ja todentamismenettelyt

RakMk osa C4 [4] ohjeistaa ikkunan lämmönläpäisykertoimen (U-arvo) määrittämisen ja erikokoisten ikkunoiden lämmönläpäisykertoimien määräysten mukaisuuden arvioimisen. Ohjeet sisältävät erään hyväksyttävän tavan todeta Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C3 lämmönläpäisykertoimelle (U) asetettujen vaatimusten täyttyminen. Ikkunoiden tuotestandardin määrittelemät EN-standardit (EN ISO 10077-1 ja 2 [5], EN ISO 12567-1 [6]) ovat myös hyväksyttävä tapa määrittää ikkunan U-arvo.

##### 3.1.1 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen laskennallisesti (EN ISO 10077)

Standardin EN ISO 10077-2 menetelmässä puite- ja karmirakenne jaetaan pieniin samasta aineesta koostuviin osiin, joiden välinen lämmönsiirto lasketaan standardissa esitettyjen kaavojen perusteella. Onteloista koostuvassa puite- ja karmirakenteessa suorakaiteen muotoisia osia voi olla niin paljon, että laskenta ilman tietokonetta on mahdotonta. Ikkunoiden laskentaan voidaan käyttää mm. Therm, Frame ja WIS-ohjelmia. Kuvassa 1 on esitetty Therm-ohjelman näkymä.



Kuva 1. Ikkunan karmi- ja puiteosan U-arvon laskennan tulostus Therm-ohjelmalla.

Therm on yhdysvaltalainen ohjelma, joka on laadittu Window-ohjelman avuksi mallintamaan karmin, puitteen ja lasin reunaosan lämmönläpäisyä. Therm perustuu lämmönsiirron ratkaisemiseen elementtimenetelmällä ja siinä ikkuna mallinnetaan kolmi- ja nelikulmaisilla elementeillä. Europpalaisessa menetelmässä lasketaan karmin ja puitteen U-arvo, kun lasiosa on korvattu lämmöneristeellä ja sen jälkeen lasketaan lasin reunaosan lineaarinen lämmönjohtavuus ( $\psi$ -arvo), kun lasiosa on paikallaan. Ikkunan U-arvo saadaan laskemalla pinta-alalla painotettu keskiarvo karmin U-arvosta, lasiosan U-arvosta ja valoaukon reunan lineaarisesta lämpökonduktanssista standardin EN10077-1 mukaisesti.

VTT:llä tehdyissä hot-box-mittauksissa ja laskennoissa on havaittu, että tietokoneohjelmilla lasketut arvot ovat yleensä poikenneet vähemmän kuin 3 % mitatuista arvoista

### 3.1.2 Lämmönläpäisykerroimen määrittäminen testaamalla (EN ISO 12567-1)

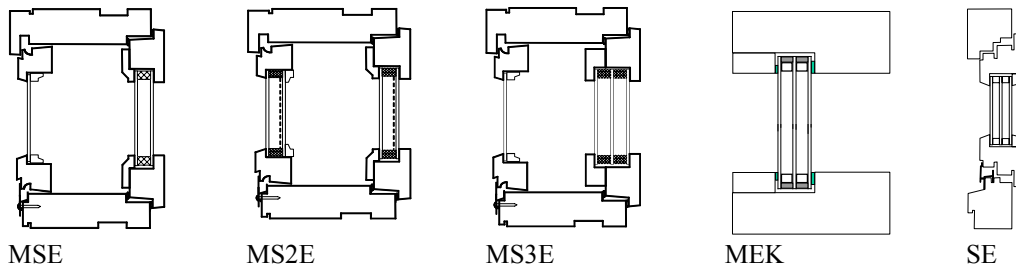
Ikkunasta valmistetaan mallikappale, joka sijoitetaan Guarded hotbox –testilaitteeseen (kuva 2). Ikkunan ulkopuitteen puolelle järjestetään ulkoilmaa vastaavat olosuhteet ja sisäpuitteen puolelle sisäilmaa simuloivat olosuhteet, tyypillisesti +20 °C / 0 °C. Sisäpuitteen puolella olevaa mittauskammiota lämmitetään ja lämmitysteho mitataan. Lämmitystehon ja lämpötilojen perusteella voidaan määrittää ikkunan lämmönläpäisykerroin. Menetelmän tarkkuus on noin  $\pm 3$  % ja laskennan ja mittauksen vastaavuus on hyvä. Mittausta käytetään U-arvon osoittamiseen erityisesti silloin, kun laskenta ei sovellu kyseiselle tuotteelle tai laskenta on hankalaa.



Kuva 2. VTT:n guarded calibrated hot box, jolla mitataan ovien, ikkunoiden ja seinäelementtien lämmönläpäisykerroin eurooppalaisiin standardeihin perustuen.

### 3.2 Suomalaisen ikkunoiden lämmöneristävyys

Suomessa käytetään ja valmistetaan pääasiassa kuvan 3 mukaisia ikkunatyyppejä. Taulukossa 5 on esitetty ikkunatyypeillä saavutettava lämmöneristävyys (huom! ominaisuudet on ilmoitettu ikkunakoolle 1,2 m x 1,2 m) [7]. Markkinoiden ”best practise” –taso lämmöneristävydessä on nähtävissä myös Energiainkuna – luokiteltujen ikkunoiden listoilta [2]. Energiamerkitetyt tuotteet on listoilla yksilöity siten, että ne on yksinkertaista hankkia: luokittelu koskee aina yksilöityä tuotetyyppeä.



Kuva 3. Suomalaisia ikkunatyyppejä.

### 3.3 Keinot parantaa lämmöneristävyttä ja käytännön rajoitukset U-arvon pienentämiselle

Keinoja ikkunan tai lasijulkisivun lasiosan lämmöneristävyden parantamiseen ovat lasien määrän lisääminen (likiarvo lämmönläpäisykerroin  $U = 5,8/n$ , missä  $n$  on lasien lukumäärä), selektiivisten matalaemissiviteettipinnoitteella pinnoitettujen ns. low-e lasien ja kalvojen käyttö (emissiviteetti 2 ... 16 %), täytekaasun (Argon tai Krypton) käyttö eristyslasissa sekä lasien ilma- tai kaasuvälin leveyden optimointi (ilma 15-18 mm, argon 14-18 mm ja krypton 9-12 mm). Karmi- ja puiteratkaisun lämmöneristävyteen vaikuttavat käytetty materiaali, rakenteen dimensiot sekä eristyslasin välilistan (teräs, alumiini, komposiitti) lämmöneristävyys. Lasiosan pinta-ala on yleensä yli 80-90 % koko ikkunan pinta-alasta, jolloin ikkunan lämmöneristävyden määrää pitkälti lasiosan toteutus. Perinteisen puisen tai puu-alumiini rakenteen



lämmöneristävyyden parantaminen esimerkiksi lämpökatkoilla vaikuttaa koko ikkunan U-arvoon alle  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Suomalaisilla ikkunatyypeillä ja nykyisillä materiaaliratkaisuilla toteutetun lasiosan saavutettavissa oleva U-arvo on noin  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja koko ikkunan U-arvo noin  $0,7\text{-}0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . U-arvon pienentäminen näistä pienemmäksi edellyttäisi uusien materiaalien ja tekniikoiden, esim. aerogelien ja tyhjälasitekniikan, käyttöönottoa.

Ikkunoiden lämmöneristävyyden parantumisella on energiankulutuksen pienemisen lisäksi myös muita positiivisia vaikutuksia. Ikkunan sisäpinta on lämpimämpi ja siitä aiheutuva säteilyvedon tunne on pienempi kuin perinteisellä ikkunalla. Tämä voi mahdollistaa uudisrakennuksissa lämpöpatterin poisjättämisen ikkunan alta viihtyisyyden kärsimättä. Haittavaikutuksena lämmöneristävyyden parantamisesta voi seurata lasiosan ulkopinnalla toisinaan esiintyvä huurtuminen (kondenssi). Tämä esiintyy kuitenkin harvoin ja on lähinnä visuaalinen haitta eikä juuri vaikuta ikkunan pitkäaikaiskestävyyteen.

Taulukko 5. Eri ikkunatyyppien lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) [7].

Ikkunatyyppi	Lasiosa	Täytekaasu	U-arvo ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	
			Lasiosa	Koko ikkuna
MSU/MS	2 x float	-	2,8 ... 3,0	2,4 ... 2,8
MSK	3 x float	-	1,7 ... 1,9	1,7 ... 1,9
MSE	3 x float	ilma	1,8 ... 1,9	1,7 ... 2,0
	float – float – selekt.	ilma	1,0 ... 1,5	1,3 ... 1,5
	float – float – selekt.	argon	0,9 ... 1,2	1,1 ... 1,3
	selekt – float – selekt.	argon	0,7 ... 1,0	0,9 ... 1,2
MS2E	4 x float	ilma	1,3 ... 1,4	1,4 ... 1,5
MS3E	3 x float + 1 x selekt.	ilma	0,8 ... 1,2	1,1 ... 1,3
	3 x float + 1 x selekt.	argon	0,7 ... 1,0	1,0 ... 1,2
	2 x float + 2 x selekt.	ilma	0,6 ... 1,0	0,8 ... 1,1
	2 x float + 2 x selekt.	argon	0,5 ... 0,9	0,7 ... 1,0
MEK	3 x float	ilma	1,8 ... 2,0	1,8 ... 2,0
	float – float – selekt.	ilma	1,0 ... 1,6	1,3 ... 1,6
	float – float – selekt.	argon	0,9 ... 1,4	1,1 ... 1,5
	selekt – float – selekt.	ilma	0,7 ... 1,3	0,9 ... 1,4
	selekt – float – selekt.	argon	0,5 ... 1,1	0,8 ... 1,3
SEK	3 x float	ilma	1,8 ... 1,9	1,7 ... 2,0
	float – float – selekt.	ilma	1,0 ... 1,5	1,3 ... 1,5
	float – float – selekt.	argon	0,9 ... 1,2	1,1 ... 1,3
	selekt – float – selekt.	argon	0,7 ... 1,0	0,9 ... 1,1
SE	3 x float	ilma	1,8 ... 2,0	1,8 ... 2,0
	float – float – selekt.	ilma	1,0 ... 1,6	1,4 ... 1,6
	float – float – selekt.	argon	0,9 ... 1,4	1,1 ... 1,5
	selekt – float – selekt.	ilma	0,7 ... 1,3	1,0 ... 1,4
	selekt – float – selekt.	argon	0,5 ... 1,1	0,9 ... 1,3

## 4. Ilmanpitävyys ja sateenpitävyys

### 4.1 Ilmanpitävyyden merkitys

Rakennuksen vuotoilman laskennallinen lämpöhäviö on suoraan verrannollinen vuotoilmavirtaan (ja vuotoilmakertoimeen). Vuotoilmavirran lämpöhäviö  $H_{\text{vuotoilma}}$  ( $\text{W/K}$ ) esitetään kaavalla (2). Lämpöhäviö lämmityskauden aikana saadaan kertomalla lukuarvo lämmityksen astepäiväluvulla.

$$H_{\text{vuotoilma}} = \rho c_p n_{\text{vuotoilma}} V / 3600 \quad (2)$$

missä  $\rho$  = ilman tiheys kg/m<sup>3</sup>  
 $c_p$  = ilman ominaislämpökapasiteetti J/kgK  
 $V$  = tilavuus m<sup>3</sup>

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa D3 Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2010 [8] määrittelee, että rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään rakennuksen vuotoilmakertoimena arvoa  $n_{\text{vuotoilma}} = 0,08$  1/h, mikä vastaa ilmanvuotolukua  $n_{50} = 2,0$  1/h. Jos ilmanpitävyyttä ei osoiteta mittaamalla tai muulla menettelyllä, käytetään rakennuksen suunnitteluratkaisun lämpöhäviön laskennassa rakennuksen vuotoilmakertoimena arvoa  $n_{\text{vuotoilma}} = 0,16$  1/h, mikä vastaa ilmanvuotolukua  $n_{50} = 4,0$  1/h. Tätä pienempää arvoa voidaan käyttää, jos ilmanpitävyys osoitetaan mittaamalla tai muulla menettelyllä. Ohjeena D3 toteaa, että sisäilmaston, rakenteiden sekä lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan kannalta tulisi rakennuksen ilmanvuotoluvun  $n_{50}$  olla enintään 1 1/h. Vuotoilmakerroin ei erottele, mistä ilma vuotaa rakennukseen, eikä kriteerejä aseteta rakennusosakohtaisesti, mutta tavoitearvo omalta osaltaan kannustaa kehittämään rakennusosia mahdollisimman ilmatiiviiksi.

Energiaikkuna-luokituksessa ilmanpitävyydelle annetaan energiankulutuksen laskennassa painoarvo  $50 * L$ , kaava (1), missä ilmanvuotoluku  $L$  (m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>) ilmaisee ikkunan läpi menevän vuotoilmavirran testauspaineessa 50 Pa. Mikäli ikkunatyypin ilmavuotoa ei testillä osoiteta, kiinteälle ikkunalle käytetään arvoa 0,1 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup> ja avattavalle arvoa 0,3 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>.

## 4.2 Ilmanpitävyyden testaus ja luokitus

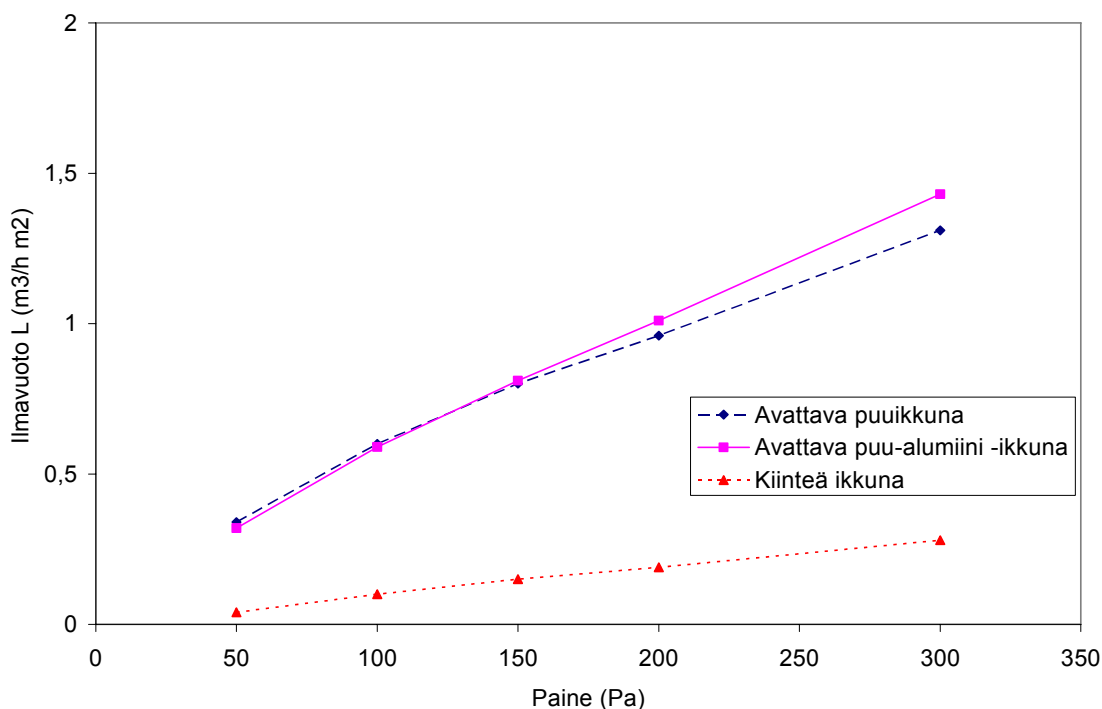
Ikkunoiden ilmanpitävyyden luokitus kuvataan standardissa EN 12207 [9] (luokat esitetty taulukossa 3) ja käytettävä testimenetelmä standardissa EN 1026 [10]. Tuotestandardissa ensimmäinen ilmanpitävyyden luokka edustaa ominaisuuksien heikointa tasoa. Ikkunan ominaisuuksille ei ole esitetty vaatimuksia tai suosituksia, vaan ainoastaan luokitteluperusteet ja ominaisuuksien luokat. Ominaisuuksien vaatimustasot on määritelty kansallisissa määräyksissä ja Suomessa on rakentamismääräyskokoelmassa määritelty ainoastaan ikkunoiden lämmönläpäisykertoimelle vaatimuksia. Edellä kuvattu suositusten puute on tiedostettu ja puuikkunoiden RT-korttia uudistettaessa uuteen korttiin RT 41-10947 [7] lisättiin tavallisimpien rakennusten ikkunoiden ominaisuuksille ohjeelliset suunnitteluarvot. Ohjeellisilla suunnitteluarvoilla on tarkoitus helpottaa ikkunoiden ostamista ja myymistä. Ikkunoiden ilmanpitävyysluokan ohjeellinen suunnitteluarvo on luokka 4, mikä tarkoittaa, että ilmanvuotoluku on alle 3 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup> 100 Pa testipaineessa.

Taulukko 6. Ikkunoiden toiminnallisten ominaisuuksien ohjeelliset suunnittelu-arvot RT-kortin RT 41-10947 perusteella [7].

OMINAISUUS	Pientalo	Matala rakennus	Korkea rakennus tai meren läheisyydessä
Lämmönläpäisykerroin (U)	RakMk C3	RakMk C3	RakMk C3
Ilmanpitävyys	4	4	4
Sateenpitävyys	A450	A600	E750
Tuulenpaineen kestävyys (paineenkestävyys)	2	3	4
Tuulenpaineen kestävyys (puitteen taipuma)	A	B	B
Ääneneristävyys	tapauskohtainen		
Lasiosan turvallisuus	tapauskohtainen, RakMk F2		
Valonläpäisevyys	> 60 %		
Auringonsäteilyn kokonaisläpäisy (g)	tapauskohtainen		

### 4.3 Suomalaisen ikkunoiden ilmanpitävyys

Suomalaisten ikkunoiden ilmanpitävyys on yleensä melko hyvä. Kuvassa 4 on esitetty kolmen ikkunatyypin ilmavuodon keskiarvo laskettuna kymmenen ikkunan mittaussarjoista (VTT:n mittauksia). Keskiarvot kertovat yleisen tason, mutta eivät erottele yksittäisiä ikkunoita, joiden tulokset voivat erota paljonkin keskiarvoista.



Kuva 4. Suomalaisen ikkunatyypin ilmanpitävyys (kymmenen mitatun ilmavuodon keskiarvo jokaiselle ikkunatyypille erikseen).

### 4.4 Sateenpitävyyden merkitys

Mikäli sadevesi pääsee tunkeutumaan väärään paikkaan ikkunarakenteessa, se voi aiheuttaa pinnoitevaurioita, materiaalin ja nurkkaliitosten halkeilua ja muodonmuutoksia. Vesi voi myös päästä ikkunarakenteen kautta muihin rakenteisiin ja huonetilaan aiheuttaen kosteus- ja homevaurioita. Näillä kaikilla on merkittävä vaikutus rakennuksen ja rakenteiden käyttöikänsä ja elinkaarikustannuksiin sekä sisäympäristön laatuun..

#### 4.5 Sateenpitävyyden testaus ja luokitus

Ikkunoiden sateenpitävyys testataan standardin EN 1027 [11] mukaan. Testilaitteeseen asennettua ikkunarakennetta sadetetaan samalla kun paine-eroa ikkunan yli nostetaan vaiheittain. Vaihe, jossa ikkuna alkaa vuotaa, määrittää sateenpitävyyden luokan (edellinen luokka alaspäin). Luokitus on esitetty standardissa EN 12208 [12]. Testausstandardi määrittelee vesivuodoksi sellaisen tapauksen, jossa vesi pääsee pinnoille, joihin sen ei ole suunniteltu pääsevän. Ikkuna ei vielä silloin vuoda, jos vesi pääsee puitteiden väliseen tilaan, mutta se edelleen pysyy vesiuurassa tai alumiiniprofiilien päällä ja johdetaan ulos rakenteesta. Kuvassa 5 on esitetty esimerkkejä sateenpitävyydestä esiintyvistä vesivuodoista.



a) Vesi täyttänyt vesiuuran

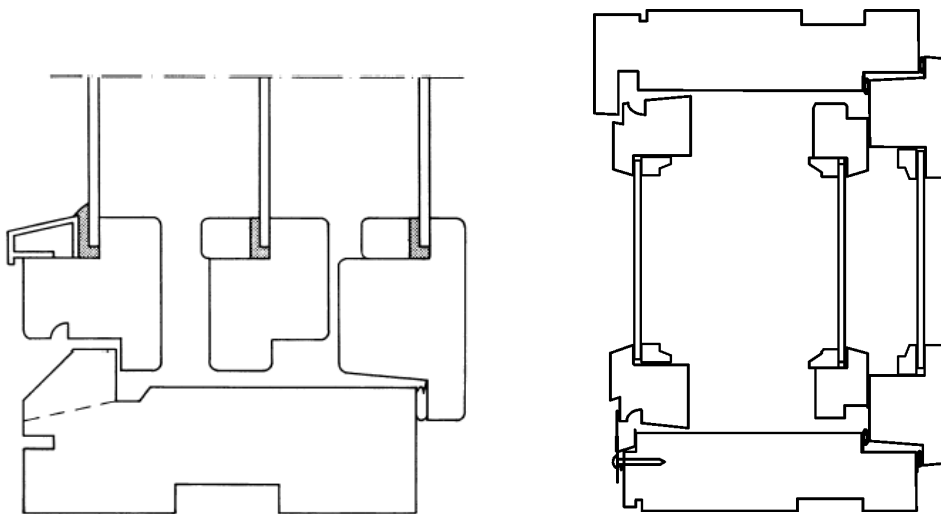


b) Vesi vuotanut alakarmin päälle

Kuva 5. Esimerkki sateenpitävyydestä esiintyvistä vesivuodoista.

#### 4.6 Suomalaisen ikkunoiden sateenpitävyys

Suomalaisten ikkunoiden sateenpitävyyden vaikuttavat lähinnä ulkopuitteen vesiuurat ja tiivistys ja sisäpuitteen ilmanpitävyys. Ulkopuitteen alla oleva vesiuura on suunniteltava siten, että sillä varmistetaan sadeveden ohjautuminen pois rakenteesta. Ulkopuitteen tiivisteseen jätetään yleensä rakoja, jotta puitteiden väliin päässyt kosteus pääsee tuulettumaan ulkoilmaan.



Kuva 6. Vesiura on jyrkitty alakarmiin tai se on alumiiniprofilissa.

#### 4.7 Keinot varmistaa ikkunan ilman- ja sateenpitävyys

Ilman- ja sateenpitävyyteen vaikutetaan karmi- ja puitterakenteen dimensioilla ja detaljeilla, tiivisteiden tyypillä ja lukumäärällä, vedenpoistoreikien /urien suunnittelulla, lukkojen tyypillä ja sijoittelulla, karmien ja puitteiden kyntesyvyyksillä, ikkunan koolla ja muodolla ja mitta- ja muototarkkuustekijöillä.

Tiivisteet ovat ikkunan ilman- ja sateenpitävyyden kannalta ratkaisevassa asemassa. Ulkopuitteen tiiviste estää sadeveden tunkeutumista puitteiden väliseen tilaan, mutta sillä ei yleensä ole paljoakaan merkitystä ikkunan ilmanpitävyyteen. Tiivisteiden mahdolliset kutistumiset ja pysyvät muodonmuutokset ovat erityisen haitallisia sateenpitävyyden kannalta. Asennuksen huolellisuus on myös ratkaisevaa. Sisäpuitteen tiiviste vaikuttaa ikkunan ilmanpitävyyteen ja jos ikkunan ilmanpitävyys on huono, sateenpitävyys on myös lähes poikkeuksetta huono. Tämä johtuu siitä, että ikkunan läpi kulkeva voimakas ilmavirta kuljettaa mukanaan myös vesipisaroita. Jos ulkopuite on tiivistetty liian tiiviiksi verrattuna sisäpuitteeseen, ikkunan sateenpitävyys on heikompi kuin esimerkiksi ikkunalla, jonka ulkopuitteen yläreunasta puuttuu tiiviste

Toisinaan ikkunoiden osat poikkeavat nimellismitoistaan valmistustarkkuuden, puun kosteusvaihteluiden ja valmistusvirheiden vuoksi. Mikäli näistä aiheutuvat poikkeamat ovat liian suuria, käyntivälit tai tiivistevarat voivat tulla liian suuriksi. Karmin ja sisäpuitteen kyntteitä kasvattamalla vuotojen riski pienenee, koska tällöin puitteen mittatarkkuus ei ole niin kriittinen tekijä tiiviiden kannalta.

Ikkunoiden asennusvaiheessa tulee varmistaa, että karmin sivut pysyvät suorina ja karmit suorakulmaisina, eivätkä nurkkaliitokset aukea karmin kiinnitysruuveja asennettaessa. Tarvittaessa saranat tulee säätää, jotta oikean kokoiset käyntivälit toteutuvat ja lukitukset menevät kiinni. Ikkunan ja asennusaukon välisen sauman tiivistys tulee varmistaa, jotta vältetään tarpeettomia ilmapuotoja. Vesipellitykset ja sadeveden ohjauksen liittymät ikkunaan ja muuhun rakenteeseen tulee varmistaa. Kunnossapidolla (mm. ennakoiva huolto ja vikojen korjaaminen) varmistetaan, että ikkuna säilyttää ominaisuutensa mahdollisimman pitkään.

### 5. Yhteenveto

Suomalaisten ikkunoiden perusrakenne on sellainen, että niillä on helppo toteuttaa hyvä lämmöneristävyys sekä ilman- ja sateenpitävyys. Karmirakenne on leveä ja ikkunassa on tilaa detaljeille, joilla hyvät ominaisuudet voidaan toteuttaa. Hyvin lämpöä eristävien ikkunoiden lämmönläpäisykerroin voi olla pienimmillään  $0,7-0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mikä saavutetaan ns. low-e selektiivilaseilla, eristyslasitekniikka käyttäen, täytekaasua (yleensä argon) ja parhaita välilista- ja karmimateriaaleja käyttäen. Ikkunan ilmanpitävyyden kannalta tärkeä yksityiskohta on sisäpuitteen tiiviys, joka varmistetaan oikealla tiivisteiden valinnalla, mitoituksella ja asennustyön laadulla sekä riittävän mittatarkalla rakenteella. Sateenpitävyyden kannalta ulkopuitteen tiiviys on keskeinen tekijä. Hyvällä ilmanpitävyydellä varmistetaan myös hyvä sateenpitävyys, koska ilmapuodon tapauksessa ilmavirta kuljettaa vesipisaroita mukanaan.

## Lähdeluettelo

- [1] SFS-EN 14351-1 Ikkunat ja sisäänkäyntiovet. Tuotestandardi, toiminnalliset ominaisuudet. Osa 1: Ikkunat ja sisäänkäyntiovet, joilla ei ole palonkestävyys- tai savunleviämisominaisuuksia sisältäen kuitenkin kattoikkunoiden ulkopuolisen palokäyttätymisen. 2006. 57 s.
- [2] [http://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/vaikuta\\_hankinnoilla/ikkunoiden\\_energialuokitus](http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/vaikuta_hankinnoilla/ikkunoiden_energialuokitus)
- [3] C3 Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto. 9 s. 2009.
- [4] C4 Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto. 24 s. 2002.
- [5] SFS-EN ISO 10077-1 Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 1: General. 2006 39 s. Part 2: Numerical method for frames. 2003. 30 s.
- [6] SFS-EN ISO 12567-1 Ikkunoiden ja ovien lämpötekniiset ominaisuudet. Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen hot box menetelmällä. Osa 1: Valmiit ikkunat ja ovet. Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by hot box method. Part 1: Complete windows and doors (ISO 12567-1:2000). 49 p.
- [7] RT 41-10947 Puu- ja puu-alumiini-ikkunat sekä niiden asennus. 2009. 20 s.
- [8] D3 Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2010. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto. 14 s. 2008.
- [9] SFS-EN 12207 Ikkunat ja ovet. Ilmanpitävyys. Luokittelu. Windows and doors. Air permeability. Classification. 2002. 10 s.
- [10] SFS-EN 1026 Ikkunat ja ovet. Ilmanläpäisevyys. Testimenetelmät. Windows and doors. Air permeability. Test method. 2000. 9 s.
- [11] SFS-EN 1027 Ikkunat ja ovet. Vesitiiviys. Testimenetelmä. Windows and doors. Watertightness. Test method. 2000. 11 s.
- [12] SFS-EN 12208 Ikkunat ja ovet. Sateenpitävyys. Luokittelu. Windows and doors. Watertightness. Classification. 2002. 6 s.

## Hyvin eristetyn ikkunan kondensoitumisherkyys kenttätutkimuksessa

Kimmo Lähdesmäki ja Juha Vinha  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

### Tiivistelmä

Tämä artikkeli on tiivistelmä kenttätutkimuksesta, jossa selvitettiin hyvin eristetyn MS2E-ikkunan ja ns. normaalisti eristetyn MSE-ikkunan eroavaisuutta ikkunan ulkopinnan kondensoitumisherkyuden kannalta. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin kondensoitumisherkyyttä ikkunan toimiessa tuloilmaikkunana. Ikkunoiden kondensoitumisherkyyttä tarkasteltiin mitatun olosuhdedatan perusteella laskennallisesti.

MS2E-ikkunan ulkopintaan muodostui kondenssin mahdollistavat olosuhteet huomattavasti useammin kuin MSE-ikkunan ulkopintaan. Erityisen paljon kondensoitumista havaittiin MS2E-ikkunassa silloin, kun ikkuna toimi tuloilmaikkunana. Tuloilmaikkunana toimiminen jäähdyttää ulkolasin ulkopintaa enemmän. Pahimpana kuukautena MS2E-ikkunan toimiessa tuloilmaikkunana, ikkunan ulkopinnassa kondenssiolosuhteita oli laskennallisesti 10 % koko kuukauden ajasta. Vuorokausitasolla kondensoituminen painottui molempien ikkunoiden osalla pääsääntöisesti yön/ aamuyön tunteihin. Ongelmallisemmaksi asian tekee pakkasjaksolla ulkopintaan tiivistyneen kosteuden jäätyminen, jolloin ikkunapinnan sulaminen on yleensä kosteuden poistumista selvästi hitaampaa ja ongelman voi havaita selvemmin myös yön jälkeen päiväsaikaan. Ulkolasin ulkopintaan tapahtuva kondenssi tai kosteuden jäätyminen ei kuitenkaan ole merkki kosteusvaurioista tai -ongelmista, vaan se on merkki hyvin eristetystä ikkunasta ja ongelmaa voidaan pitää esteettisenä.

### 1. Johdanto

Hyvin eristettyjen ikkunoiden ulkopinnoissa on havaittu kosteuden tiivistymistä enemmän kuin ns. normaalisti eristetyissä, esimerkiksi 3-lasisissa MSE-ikkunoissa. Yleisesti on tiedossa, että paremmin lämpöä eristävän ikkunan uloimman lasin ulkopinnan lämpötila alittaa herkemmin ulkoilman kastepistelämpötilan, jolloin kosteuden kondensoituminen ikkunan ulkopintaan alkaa. Tampereen teknillisen yliopiston toimesta tutkittiin kenttätutkimuksella Tampereella alun perin 1970-luvun loppupuolella rakennetussa kerrostalon huoneistossa MSE-ikkunan ja MS2E-ikkunan toimivuutta mm. kondenssin kannalta. Tutkimus kesti noin yhden vuoden ajan. Lisäksi tutkimuksessa seurattiin miten ikkunoiden toimiminen tuloilmaikkunoina vaikuttaa tilanteeseen. Lähtökohtana tutkimukselle oli, että kerrostaloyhtiössä oli uusittu ikkunat ja mm. se, että kerrostaloyhtiön useilta asukkailta oli tullut valituksia MS2E-ikkunan ulkopinnan kondenssi-ongelmista. Tutkimusta varten yksi uusi ikkuna oli MSE-ikkuna. [1]

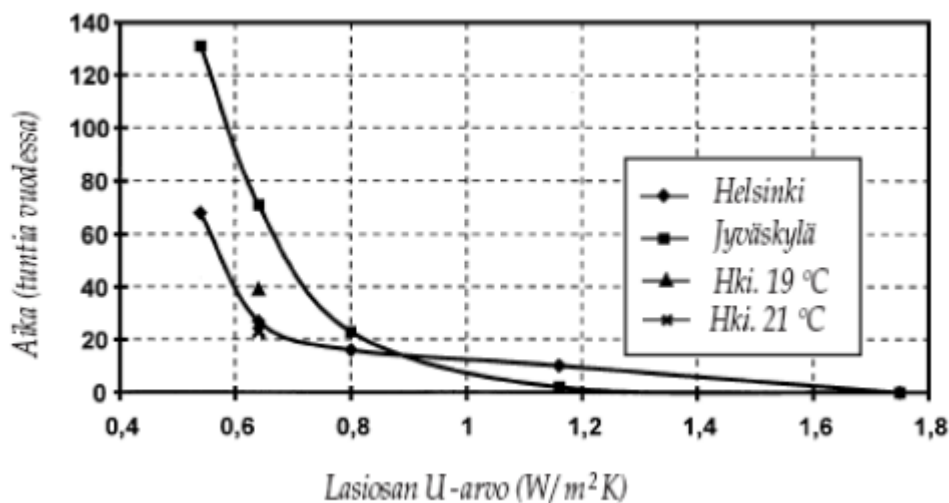
Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan ikkunan ulkopintaan tiivistynyttä kosteutta, eikä ikkunan sisäpinnan tai välitilan mahdollisia kosteuden kondensoitumisasioita otettu huomioon.

## 2. Yleistä ikkunan U-arvosta ja kondenssi-ilmistä

Ikkunan lämmönläpäisykerroin eli U-arvo muodostuu lasiosan lämmönläpäisykerroimesta, valoaukon reunan viivamaisesta lisäkonduktanssista sekä karmi- ja puiteosan lämmönläpäisykerroimista. Lasiosan suuresta pinta-alasta johtuen lasiosa muodostaa merkittävän osan koko ikkunan lämmöneristävyydestä. Hyvin eristetyn ikkunan ulkopinnan kondensoitumisen kannalta oleellisin tekijä on lasiosan lämmönläpäisykerroin. Lasiosan U-arvo riippuu käytännössä kahdesta asiasta; käytetystä lasityypistä/ pinnoitetyypistä sekä eristyslasin täytekaasusta. [2]

Suurin ulkoilman kosteuden tiivistymisriski lasin ulkopintaan on syksyisin, jolloin ulkoilman kosteus on suuri ja ikkunan lämpöhäviö ulko- ja sisäilman pienen lämpötilaeron vuoksi on pieni. Toinen tekijä, mikä aiheuttaa kosteuden tiivistymistä ikkunoiden ulkopintoihin on ulkoilman lämpötilan nopea nouseminen kylmän ja kostean yön jälkeen. Tässä tilanteessa ikkunan lämpötila seuraa viiveellä ilman lämpötilaa ikkunan lämpökapasiteetin vuoksi. [2]

Aiempien tutkimusten mukaan kondenssin esiintymisaika nousee erittäin selvästi, kun lasiosan lämmönläpäisykerroin pienenee tasolle 0,6-0,7 W/m<sup>2</sup>K [2]. Kuvassa 1 on esitetty ikkunan ulkopinnan kondenssin esiintymisaika Helsingissä ja Jyväskylässä vuoden 1979 säätietojen perusteella laskettuna. Lähteessä [2] on arvioitu, että kuvan 1 käyrän muoto on todennäköisesti varsin oikea, mutta kondenssin esiintymisaikoihin vaikuttavat merkittävästi laskelmissa vakioiksi oletetut ympäristötekijät, minkä vuoksi ajat ovat suuntaa antavia.



Kuva 1. Ikkunan ulkopinnan kondenssin laskettu esiintymisaika tarkasteluvuonna 1979 Helsingissä ja Jyväskylässä huoneen sisälämpötilan ollessa 20 °C. Helsingin säätiiedoilla tilannetta on tarkasteltu myös sisälämpötiloilla 19°C ja 21 °C (kuvassa yksittäiset pisteet).[2]

Kosteuden tiivistyminen ikkunan ulkopintaan on tunnettu ilmiö myös ulkomailla. Erityisesti Pohjoismaissa, missä ikkunan lämmöneristävyys on hyvä verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan. Ruotsissa ilmiöstä puhuttiin ensimmäisen kerran yleisemmin jo 1990-luvun alkupuolella. Samoihin aikoihin myös Suomessa havainnoitiin yksittäisiä tapauksia ensimmäisiä kertoja. [2]



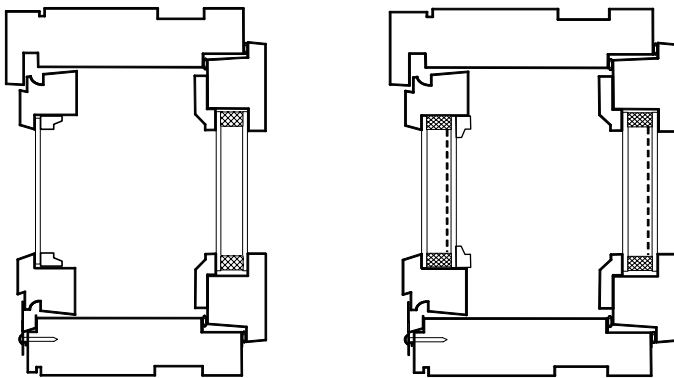
### 3. Kenttätutkimuksen lähtötiedot

#### 3.1 Koekohde ja tutkittavat ikkunat

Tutkittavana koekohteena oli Tampereella sijaitsevan kerrostalon 5. kerroksessa olevan huoneiston kaksi ikkunaa. Tutkittavat ikkunat olivat vierekkäisten huoneiden pohjoisen suuntaan olevat ikkunat; makuuhuoneen hyvin lämpöä eristävä MS2E-ikkuna ja viereisen huoneen (keittiön) MSE-ikkuna. [1]

Tutkittava MS2E-ikkuna oli kaksipuitteinen puualumiini-ikkuna, jonka molemmissa puitteissa oli eristyslaselementti. Molemmat eristyslaseit olivat argon-täytteisiä selektiivielementtejä. Ikkunan valmistajalta saadun tiedon mukaan MS2E-ikkunan lasiosan U-arvo oli  $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja koko ikkunan U-arvo  $0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [1]

MSE-ikkuna oli kaksipuitteinen kolmilasinen puualumiini-ikkuna, jonka sisäpuiteessa oli argon-täytteenen selektiivipintainen eristyslaselementti. Ulkopuite oli yksilasinen. Ikkunan valmistajalta saadun tiedon mukaan MSE-ikkunan lasiosan U-arvo oli  $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja koko ikkunan U-arvo  $1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva MSE- ja MS2E-ikkunasta.[1]

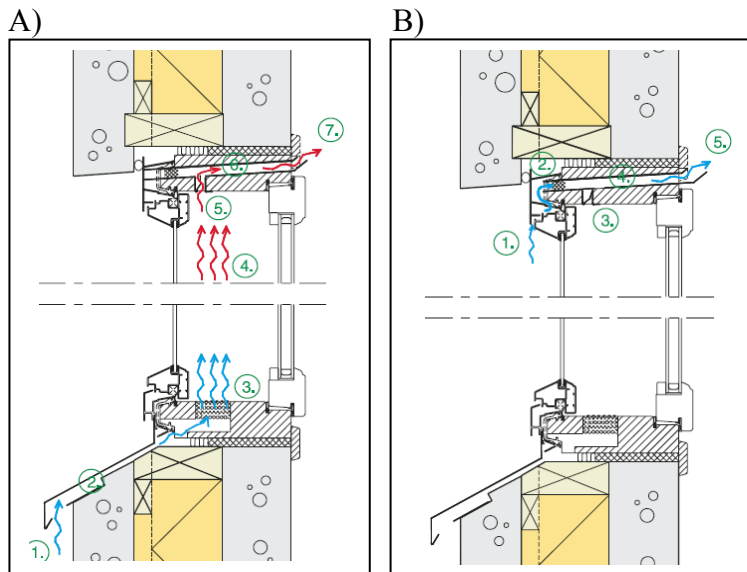


Kuva 2. Periaatekuvat MSE- ja MS2E-ikkunoista [3].

Molemmat tutkitut ikkunat olivat rakenteeltaan tuloilmaikkunoita. Ikkunan tuloilmaventtiili sijaitsi kummassakin ikkunassa ikkunan yläkarmissa. Normaalisessa käytössä tuloilmaventtiilin ollessa ns. talviasennossa, ulkoa tuleva korvausilma liikkuu ikkunan alakarmin korvausilmaventtiilin kautta ikkunan välitilaan ja sieltä edelleen ikkunan yläkarmin tuloilmaventtiilin kautta sisäilmaan. Korvausilman kulkiessa ikkunoiden välitilan kautta sisään, ulkoa tuleva korvausilman lämpötila nousee. Korvausilmaventtiilin ollessa ns. kesäasennossa korvausilma johdetaan ulkoa sisälle suoraan yläkarmin kautta, jolloin korvausilma ei kulje ikkunoiden välitilassa. [1]

Tässä tutkimuksessa tuloilmaventtiili oli sekä kesä- että talviasennossa vuodenaikasta riippumatta (ks. taulukko 2), jolloin saatiin selvyyttä tuloilmaikkunan kondenssiherkkyydestä verrattuna tilanteeseen, jossa ikkuna ei toimi tuloilmaikkunana. Tuloilmaventtiilin kesäasennon toimivuus varmistettiin lisäksi teippaamalla ikkunan ylä- ja alakarmissa olevat korvausilma-aukot. [1]

Kuvassa 3 on esitetty periaatekuvat tuloilmaikkunan toiminnasta ja korvausilman kulkeutumisesta ikkunoissa.



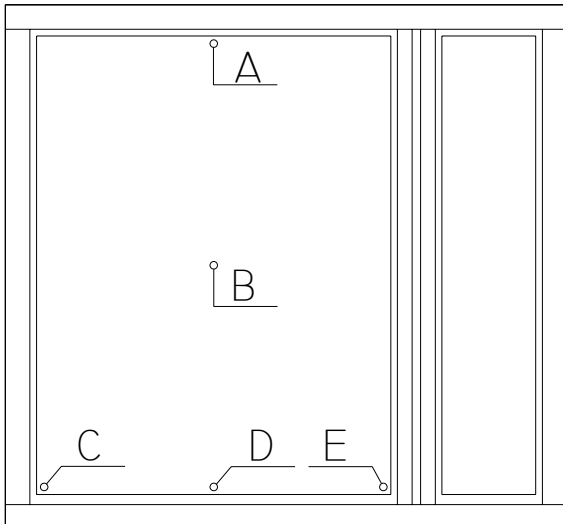
Kuva 3. A) Tuloilmaikkunan toiminta normaalisti talviaikana, kun korvausilma johdetaan sisälle ikkunoiden välitilan kautta. B) Tuloilmaikkunan toiminta kesällä, jolloin ikkuna toimii ns. normaalin ikkunan tapaan. Korvausilma johdetaan sisälle suoraan yläkarmissa olevan tuloilmaventtiilin kautta. [1]

### 3.2 Mittausjärjestelmä

Mittaukset suoritettiin erillisellä tutkimusta varten rakennetulla mittausjärjestelmällä, joka koostui tietokoneesta, dataloggerista, mittausantureista ja antureiden lähettimistä. Mittausdata tallentui dataloggerin avulla tietokoneelle 15 minuutin välein koko tutkimuksen aikana. [1]

Molemmista ikkunoista mitattiin pintalämpötiloja jokaisesta lasipinnasta samoista kohdista: Ikkunan yläreunasta keskeltä, ikkunan keskeltä, ikkunan alareunasta keskeltä sekä alanurkista. Lisäksi molempien ikkunoiden välitiloista ikkunoiden keskiosalta mitattiin välitilan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Näiden lisäksi mitattiin sisä- ja ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Tutkimuksessa mitattiin myös ulko- ja sisäilman välisiä sekä sisäilman ja ikkunoiden välitilojen välisiä paine-eroja. [1]

Kuvassa 4 on esitetty ikkunoiden lasipintojen lämpötilojen mittauskohdat. Kuvassa 5 on esitetty ikkunan keskikohdan mittausantureita (kuva MSE-ikkunasta).



Kuva 4. Ikkunoiden pintalämpötilojen mittauskohdat (mittauskohdat olivat samat jokaisen lasin molemmissa pinnoissa) [1].

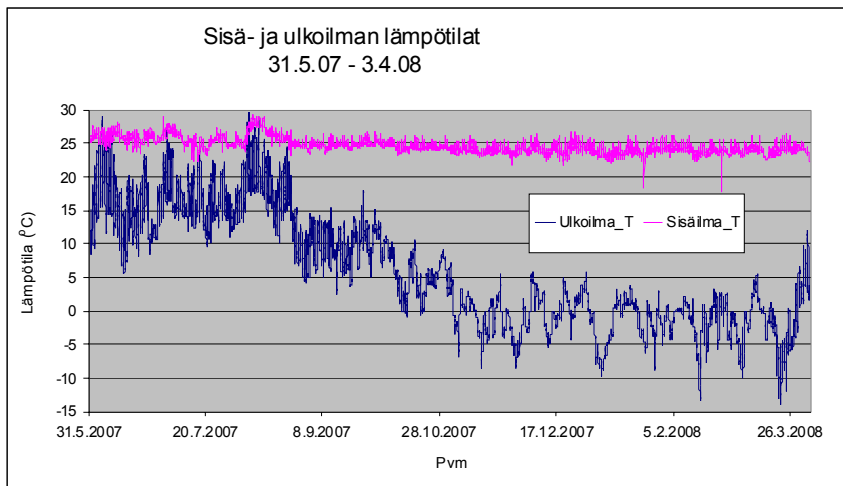


Kuva 5. Ikkunan keskikohta (mittauspiste B, ks. kuva 4). Kuvassa on näkyvissä lasin pinnoissa kiinni olevat pintalämpötila-anturit sekä ikkunan välitilan ilmassa oleva T/RH-anturi. Kuva keittiön MSE-ikkunasta. [1]

## 4. Kenttätutkimuksen tulokset

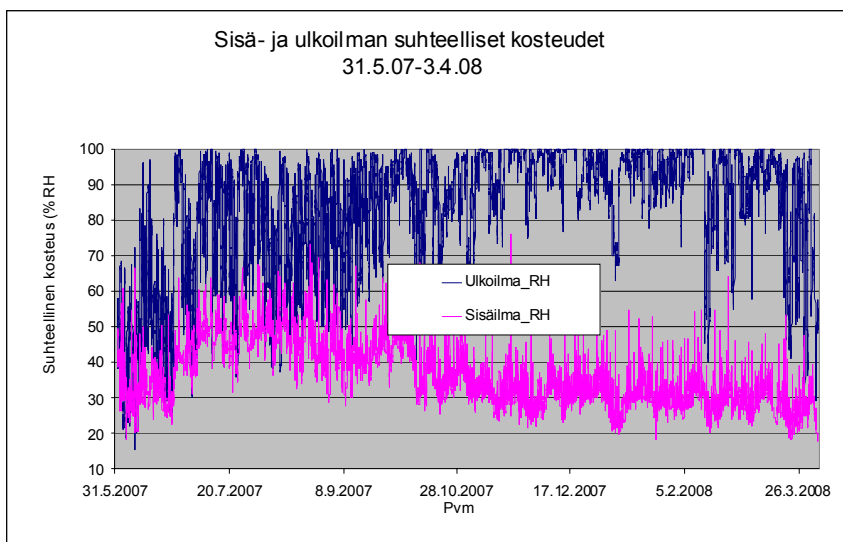
### 4.1 Koeolosuhteet

Tutkimus tehtiin normaaleissa, kyseisen kerrostalohuoneiston, sisäilman lämpötila- ja suhteellisen kosteuden olosuhteissa. Kerrostalohuoneiston lämmitysmuotona oli vesikiertoinen patterilämmitys ja ilmanvaihtona koneellinen poistoilmanvaihto. Lämmitys ja ilmanvaihto säädettiin keskitetysti koko taloyhtiön osalla. Tutkimuksessa ei selvitetty huoneiston lämpötilan säätöarvoja tai ilmanvaihdon toimintaa/ käyntiaikoja. [1] Kuvassa 6 on esitetty sisä- ja ulkolämpötilat ja kuvassa 7 sisä- ja ulkoilman suhteelliset kosteudet tutkimuksen aikana.



Kuva 6. Sisä- (ylempi käyrä) ja ulkolämpötilat (alempi käyrä) tutkimuksen aikana [1].

Sisäilman lämpötila pysyi koko tutkimuksen ajan melko tasaisena. Kesällä ja syksyllä sisälämpötila oli noin 25 °C tai hieman korkeampi ja talvella hieman alle 25 °C. Koko tutkimuksen aikana sisälämpötilan keskiarvo oli 24,6 °C ja ulkolämpötilan 5,8 °C. [1]



Kuva 7. Sisä- (alempi käyrä) ja ulkoilman (ylempi käyrä) suhteelliset kosteudet tutkimuksen aikana [1].

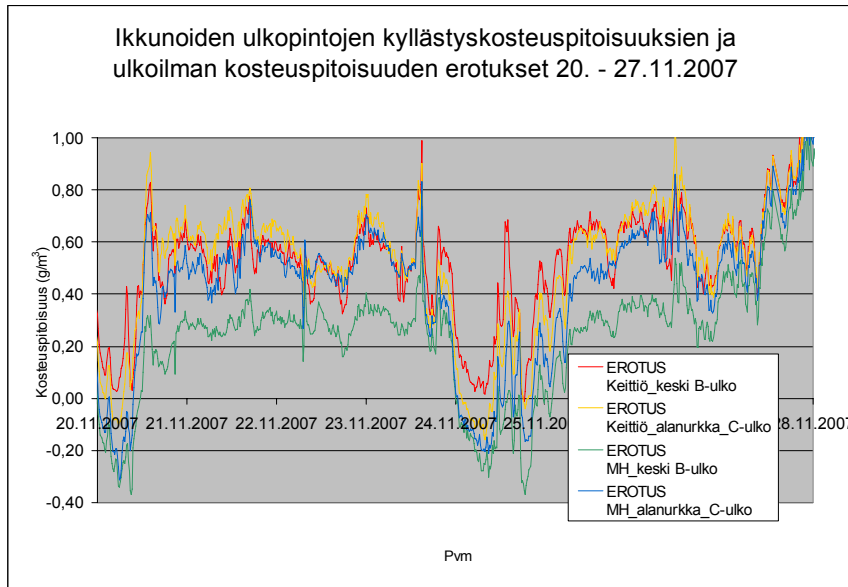
Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihteli tyypillisesti vuodenaikojen ja vuorokauden aikojen mukaan voimakkaasti. Tutkimuksen aikana erityisesti loppusyksystä/ talvella ulkoilman suhteellinen kosteus oli useita kertoja yhtäjaksoisesti pitkiäkin aikoja 100 % RH tai lähellä sitä. Tutkimuksen aikana erityisesti syksyllä vallinnutta ulkoilman suhteellista kosteutta voidaan pitää normaalia vuotta korkeampana vastaavana aikana. [1]

#### 4.2 Ulkopintojen pintalämpötilat ja laskennalliset kondenssitarkastelut

Ikkunoiden ulkopintojen laskennallisia kondenssitarkasteluja varten määritettiin ulkoilman ja ulkopintojen laskennalliset kyllästyskosteudet ulkoilman vesihöyrypitoisuuden avulla. Ulkoilman vesihöyrypitoisuudet laskettiin ulkolämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla lähteissä [4; 5] ja lähteessä [6] olevilla kaavoilla. Lähteissä [4; 5] oleva kaava laskee ilman vesihöyrypitoisuuden ns. veden yli kaavalla ja lähteessä [6] oleva kaava ns. jään yli olevalla kaavalla. Kaavat antavat

saman ilman kyllästyskosteuspitoisuuden, kun ilman lämpötila on 0 °C:een yläpuolella. Lämpötilan ollessa 0 °C:een alapuolella, jään yli kaava antaa vähän pienemmän kyllästyskosteuspitoisuuden. Tulokset laskettiin em. kaavojen keskiarvoina.

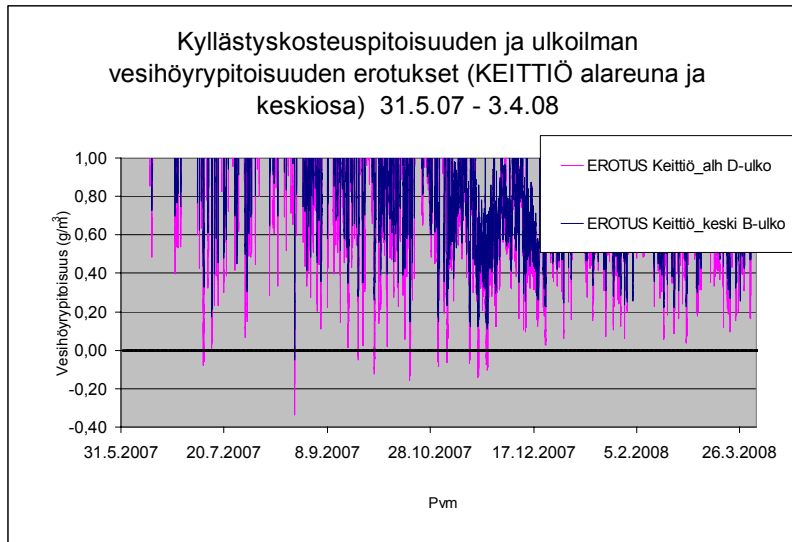
Kuvassa 8 on esitetty esimerkkinä tutkimuksen aikaiselta yhden viikon jaksolta ikkunoiden ulkopintojen kyllästyskosteuspitoisuuksien ja ulkoilman kosteuspitoisuuksien erotukset kahdesta mittauspisteestä (mittauspiste B ikkunan keskeltä ja mittauspiste C ikkunan alanurkasta) molempien ikkunoiden osalta. Kuvan 8 kuvaajassa kosteuspitoisuuden erotuksen mennessä negatiiviseksi, tapahtuu laskennallisesti kosteuden kondensoituminen ikkunan ulkopintaan. [1]



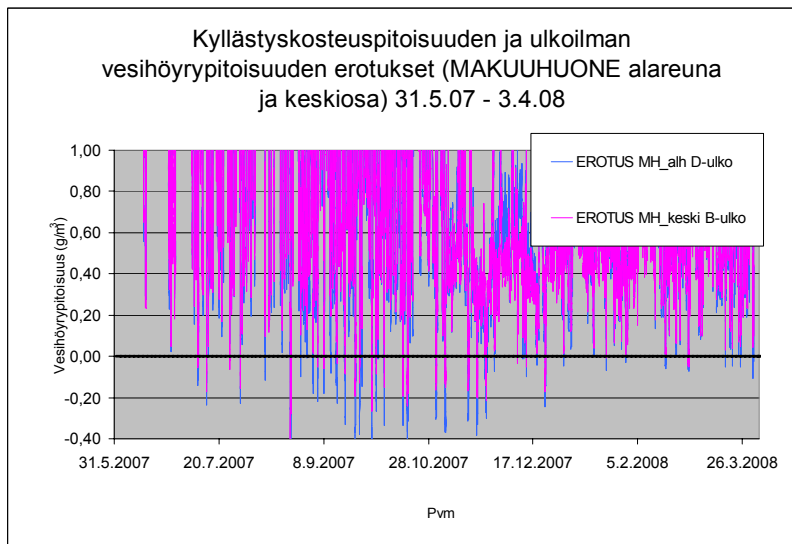
Kuva 8. Keittiön (MSE-ikkuna) ja makuuhuoneen (MS2E-ikkuna) ikkunoiden ulkopintojen kyllästyskosteuspitoisuuksien ja ulkoilman kosteuspitoisuuksien erotukset yhden viikon ajalta (20.-27.11.2007) [1].

Kuvasta 8 nähdään, että MS2E-ikkunan molemmat ”erotuskäyrät” (erityisesti MS2E-ikkunan keskikohta) ovat MSE-ikkunan käyriä alempana käytännössä koko ajan, mikä kertoo MS2E-ikkunan olevan poikkeuksetta lähempänä kondenssilannetta. MSE-ikkunan osalla kuvassa 8 oleva ”erotuskäyrä” käy vain kerran nollan alapuolella.

Kuvassa 9 on esitetty keittiön MSE-ikkunan ulkopinnan keskiosan (mittauspiste B) ja alareunan (mittauspiste D) ikkunan ulkopinnan kyllästyskosteuspitoisuuden ja ulkoilman kosteuspitoisuuden erotukset koko tutkimuksen ajalta. Kuvassa 10 on esitetty vastaava kuvaaja makuuhuoneen MS2E-ikkunan osalta.



Kuva 9. MSE-ikkunan ulkopinnan keskiosan ja alareunan kyllästyskosteuksien ja ulkoilman kosteuspitoisuuden erotukset koko mittauksen aikana. Käyrien mennessä nollan alapuolelle ikkunan ulkopintaan kondensoituu laskennallisesti kosteutta. [1]



Kuva 10. MS2E-ikkunan ulkopinnan keskiosan ja alareunan kyllästyskosteuksien ja ulkoilman kosteuspitoisuuden erotukset koko mittauksen aikana. Käyrien mennessä nollan alapuolelle ikkunan ulkopintaan kondensoituu laskennallisesti kosteutta. [1]

Taulukoon 1 on kerätty ulkolasin ulkopinnan laskennallinen kondensoitumisaika (h) molempien ikkunoiden mittauspisteissä B ja D koko tutkimuksen ajalta (kesto noin 7400 h).

Taulukko 1. Ulkolasin ulkopinnan kondenssiaika (h) mittauspisteissä B ja D tutkimuksen aikana. [1]

Kondenssiaika (h)			
MSE-ikkuna, keskiosa (B)	MSE-ikkuna, alareuna (D)	MS2E-ikkuna, keskiosa (B)	MS2E-ikkuna, alareuna (D)
0,5	67	128	198

Taulukossa 2 on esitetty ikkunoiden ulkopuolisen kondenssin esiintymisaika (h) laskennallisesti keksiarvoina kuukausittain. Taulukossa on myös mainittu onko ikkuna toiminut tuloilmaikkunana ko. kuukautena.

Taulukko 2. Ulkolasin ulkopinnan kondenssiaika (h) mittauspisteissä B ja D koko tutkimuksen aikana kuukausittain. [1]

Tarkastelu kuukausi	Kondenssiaika (h)				
	Ikkunat tuloilma- ikkunana	MSE_ keski (B)	MSE_ alareuna (C)	MS2E_ keski (B)	MS2E_ alareuna (D)
Kesäkuu 07	Kyllä	0	0	0	0
Heinäkuu 07	Kyllä	0	1	6	6
Elokuu 07	Kyllä	0,3	3	4	5
Syyskuu 07	Kyllä	0	5	13	33
Lokakuu 07	Kyllä	0	8	17	23
Marraskuu 07	Kyllä	0,3	34	48	66
Joulukuu 07	Ei	0	2	9	15
Tammikuu 07	Ei	0	3	8	12
Helmikuu 07	Ei	0	5	9	14
Maaliskuu 07 *)	Ei	0	2	5	6
Maaliskuu 07 **)	Kyllä	0	6	10	19

\*) 1.3. – 13.3.2008 välinen aika

\*\*\*) 13.3. – 31.3.2008 välinen aika

### 4.3 Muita tutkimuksessa tehtyjä havaintoja

Tutkimuksessa selvitettiin mm. ikkunoiden välitilojen lämpö- ja kosteusolosuhteita, lasipintojen lämpötiloja myös muiden kuin ulkopintojen osalta sekä sisä- että ulkoilman ja ikkunoiden välitilojen keskinäisiä paine-eroja. Tämän artikkelin yhteenveto-osiossa tarkastellaan lyhyesti lisäksi ikkunoiden välitilojen kautta sisäilmaan virtaavan korvausilman lämpötilaa, kun ikkunat toimivat tuloilmaikkunoina.

## 5. Yhteenveto

Ikkunan lasiosan lämmöneristävyys vaikuttaa ikkunan ulkopinnan lämpötilaan ja sitä kautta ikkunan ulkopinnan kondensoitumisherkkyyteen. Tutkimuksessa olleen MS2E-ikkunan lasiosa oli selvästi lämpöä eristävämpi kuin MSE-ikkunan lasiosa. Tutkimuksessa havaittiin MS2E-ikkunan ulkopinnan kondensoitumista huomattavasti enemmän kuin MSE-ikkunan. Eniten kondensoitumista havaittiin MS2E-ikkunassa silloin, kun ikkuna toimi tuloilmaikkunana. Tuloilmaikkunana toimiminen jäähdyttää ulkolasin ulkopintaa entisestään. Koko tutkimus kesti noin 7400 h, tänä aikana MS2E-ikkunassa ikkunan alareunan kondenssia havaittiin ajallisesti noin kolme kertaa enemmän kuin MSE-ikkunassa (198 h vs. 67 h). Kuukausitasolla MS2E-ikkunassa eniten kondenssia laskennallisesti tapahtui marraskuussa, jolloin kondenssia oli noin 10 % kuukauden koko ajasta. Ei-tuloilmaikkunana toimiessaan eniten kondenssia MS2E-ikkunassa kuukausitasolla havaittiin 2 %:ssa koko kuukauden tunneista. MSE-ikkunan toimimisella tuloilmaikkunana ei kondenssin kannalta juurikaan ollut merkitystä lukuun

ottamatta marraskuuta, jota voidaan pitää kondensoitumisen kannalta muutenkin melko otollisena aikana. Ko. marraskuuta lukuun ottamatta MSE-ikkunan ulkopinnassa kondenssiolosuhteita havaittiin erittäin vähän.

Vuorokausitasolla laskennallinen kondensoituminen painottui selvästi yön/ aamuyön tunteihin. Yksittäisinä kertoina kondensoitumisjaksoja oli pidempään (10-12 h), jolloin myös päiväsaikaan lasipinnat olivat kondenssissa. Tiivistyneen veden poistuminen tapahtuu lasin pinnasta pääasiassa haihtumalla, joten siihen vaikutti mm. ilman lämpötila-, kosteus- ja tuuliolosuhteet. Tilanne on hyvin erilainen pakkasjaksolla, kun tiivistynyt kosteus jäätyy ikkunan pintaan. Jään poistuminen lasin pinnasta on usein hidasta, vaikka varsinaista kondenssiolosuhdetta lasin pinnassa ei olisikaan. Laskennallisesti tällaisten ajanjaksojen keston arvioiminen on hankalaa. Kondenssiajat ovat tällöin kuitenkin pidempiä, kuin tässä laskennallisesti esitetyt ajat. Joka tapauksessa tulee muistaa, että ulkolasin pintaan tapahtuva kondenssi tai kosteuden jäätyminen ei ole merkki kosteusvaurioista tai -ongelmista, vaan sitä voidaan pitää lähinnä esteettisenä ongelmana.

Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että kondensoitumistarkastelut ovat laskennallisia ja niihin vaikuttavat mm. lämpötila- ja kosteusantureiden tarkkuus. Toisaalta molempien ikkunoiden osalla mittaustarkkuudet ovat samoja ja siten vertailtaessa kahden ikkunan välisiä tuloksia, asialla ei ole niin suurta merkitystä.

MS2E-ikkuna toimii tuloilmaikkunana MSE-ikkunaa paremmin, kun kriteerinä on ikkunan kautta sisään tulevan korvausilman lämpötila. MS2E-ikkunan kautta sisäilmaan tulevan ilman lämpötila oli 3-5 °C korkeampi kuin MSE-ikkunan ulkolämpötilan olleessa alueella -15...0 °C ja koneellisen poistoilmanvaihdon toimiessa tässä koekohteessa olevalla tavalla. Paremman U-arvon lisäksi myös sisään tulevan korvausilman korkeamman lämpötilan vuoksi MS2E-ikkunaa voidaan pitää energiataloudellisesti MSE-ikkunaa parempana.

## Lähdeluettelo

- [1] Lähdesmäki, K. & Vinha, J. 2008. MS2E- ja MSE-ikkunan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden seurantamittaus kerrostalohuoneistossa. Tutkimusselostus N:ro TRT/1684/2008. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [2] Hemmilä, K. & Heimonen, I. 1997. VTT Rakennustekniikka. Kondenssi ikkunoiden ulkopintaan. Artikkel. Lasirakentaja 1/97.
- [3] Hemmilä, K. 2008. VTT Rakennustekniikka. Mahdollisuudet parantaa ikkunoiden lämmöneristävyyttä. Artikkel. Lasirakentaja 1/08.
- [4] Hyland, R. W. & Wexler, A. 1983a. Formulations for the Thermodynamic Properties of Dry Air from 173,15 K to 473,15 K, and of Saturated Moist Air from 173,15 K, at Pressures up to 5 Mpa, ASHRAE Trans., 89/2, pp. 520-535.
- [5] Hyland, R. W. & Wexler, A. 1983b. Formulations for the Thermodynamic Properties of Saturated Phases of H<sub>2</sub>O from 173,15 K to 473,15, ASHRAE Trans., 89/2, pp. 500-519.
- [6] SFS-EN ISO 13788:2001. Rakennuskomponenttien ja -elementtien lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Sisäpinnan lämpötila, jolla vältetään kriittinen pintakosteus ja kosteuden siirtyminen.



## **6. Homeen kasvu rakennuksissa**



# Käytännön esimerkkejä rakennusten kontaminoitumisesta ja niiden puhdistamisesta

Pertti Metiäinen

Sosiaali- ja terveystieteiden lupa- ja valvontavirasto, Valvira

## Tiivistelmä

Vahinkoja ja onnettomuuksia tapahtuu rakennuksen elinkaaren aikana rakennustyömaan aloituksesta koko käyttöiän loppuun saakka. Niiden seurauksena voi rakennuksen sisäilmaan päästä haitallisia epäpuhtauksia, jotka voivat aiheuttaa eriasteisia terveyshaittoja. Epäpuhtauksien poisto vaatii erikoisosaamista. Tekstissä käsitellään kolmea erilaista tapausta ja kokemuksia niiden puhdistamisesta.

## 1. Johdanto

Rakennus voi elinkaarensa aikana kontaminoitua fysikaalisesti monella eri tavalla: nesteet valuvat painovoimaisesti ja imeytyvät rakenteisiin, hiukkaset leijuvat ja laskeutuvat pinnoille tai kiinnittyvät sähkövarauksella pintoihin, kaasumaiset yhdisteet voivat imeytyä huokosiin rakenteisiin (absorptio) ja kiinnittyä pintaan (adsorptio) vapautuakseen myöhemmin sisäilmaan (desorptio).

Tyypillisiä epäpuhtauslähteitä ovat rakenteissa olevat mikrobikasvustot, jotka tuottavat sekä hiukkasmaisia, että kaasumaisia päästöjä. Niiden puhdistamisesta löytyy runsaasti ohjeita, esim. Hengitysliitto Helin internetsivuilta [1]. Uudis- tai korjausrakennustyömaalla voi saattaa vahinkoja tai onnettomuuksia, joiden seurauksena polttoöljyä tai erilaisia liuottimia pääsee valumaan ja imeytymään rakenteisiin. Tulipalojen hiukkaset, palokaasut ja sammutusaineet ovat oma erikoisalueensa, jotka vaativat erityisasiantuntemusta. Uusi mahdollinen epäpuhtauslähde ovat elohopeaa sisältävät energiansäästölamput, jotka rikkoutuessaan voivat vapauttaa sisältämänsä elohopean sisätiloihin. Elohopean puhdistamisohjeita löytyy mm. USA:n ympäristönsuojeluviraston EPA:n internetsivuilta [2].

Kontaminaatioista syntyy erilaisia terveys- tai viihtyisyyshaittoja riippuen epäpuhtauslähteestä ja kontaminaation laajuudesta. Epäpuhtauksien poisto vaatii erikoisosaamista, jota esimerkiksi monilta vakuutusyhtiöiltä, insinööritoimistoilta tai puhdistusyryyksiltä löytyy. Käytettyjä puhdistustoimenpiteitä ovat pilaantuneen materiaalin uusiminen, rakenteiden lämmitys ja ilmanvaihdon lisääminen (baking out), mekaaninen tai kemiallinen puhdistus, hajun poisto sekä rakenteiden kapselointi.

## 2. Kokemuksia asuntojen kontaminoitumisesta ja puhdistamisesta

Kirjoituksessa keskitytään kolmeen todelliseen tapaukseen, jotka käsiteltiin Helsingin kaupungin ympäristökeskuksessa tai Valvirassa.

### 2.1 Case 1. Korjaustyömaalle valunut polttoöljy

Kerrostalon korjaustyömaalla sattui työmaan polttoainesäiliön täyttövaiheessa ylivuoto syystalvella. Kevyttä polttoöljyä käytettiin työmaan polttoöljylämmittimissä. Työmaan polttoainesäiliö oli sijoitettu alimman kerroksen asuntoon. Vahinko aiheutui siitä, että polttoaineen toimittaja laittoi polttoainepistoolin säiliöön, avasi hanan ja poistui paikalta. Pistoolin hätäkatkaisija ei toiminut, jolloin öljyä purskahti lattialle säiliön täytyttyä. Arvio betonilattialle vuotaneesta polttoöljystä vaihteli muutamasta kymmenestä litrasta aina pariin sataan litraan.

Työmaalla tehtiin heti ensiapuna imeytysturpeen levitys neljään kertaan valuma-alueella. Mutta sitten asia unohtui eikä muita puhdistustoimenpiteitä tehty. Vanhaa lattiaa oli korotettu sepelikerroksella ja sen päälle oli valettu uusi betonilattia. Korjaustyömaa valmistui keväällä ja asukkaat muuttivat takaisin. Vahinkoasunnon asukkaat ihmettelivät asunnossaan outoa hajua noin puoli vuotta onnettomuuden jälkeen. Asunnon sisäilmasta tutkittiin VOC- ja PAH-yhdisteiden pitoisuudet, jotka olivat korkeita ja niiden pääkomponentit koostuivat alifaattisista/aromaattisista sekä naftaleeni- yhdisteistä, jotka ovat tyypillisiä polttoöljyn haihtuvia komponentteja.

Kun sisäilmamittausten tulokset selvisivät, urakoitsija järjesti asukkaille sijaisasunnon. Urakoitsija halusi ensin välttää valmiiden lattiarakenteiden purkua ja kokeili korjauksessa mikrobitorjuntaa (polttoöljyä syöviä mikrobeja). Kesällä sokkeliin tehtiin kolme n. 150 mm kokoista reikää, jonka kautta sujutettiin 3 – 4 m mittaiset putket lattian alapuoliseen sepelitilaan. Putkien kautta ruiskutettiin kolmena eri kertana mikrobitorjuntaemulsiota paineella muutaman viikon välein. Torjunnan aikana sepelitila alipaineistettiin. Torjunnan jälkeen mitattiin sisäilmapitoisuudet uudelleen. Tuloksissa ei havaittu mainittavaa pitoisuuksien laskua, joten todettiin, ettei mikrobitorjunta tällä kertaa toiminut halutulla tavalla.

Syksyllä urakoitsija poisti sekä uuden että vanhan betonilaatan. Vanhan betonilaatan alapuolella olleen maa-aineksen päälle valettiin n. 50 mm paksu betonilaatta, vanhan betonilaatan reunat betonoitiin suojabetonilla, alapohja täytettiin kevytsoralla ja päälle valettiin uusi betonilaatta. Näillä toimenpiteillä sisäilman pitoisuudet laskivat normaalille tasolle ja asukas muutti kevättälvella takaisin asuntoonsa. Jälkivalvonnassa, seuraavana syksynä sisäilmamittausten pitoisuudet olivat pysyneet tavanomaisella tasolla ja asukkaat kertoivat haastattelussa olevansa tyytyväisiä tehtyihin korjauksiin.

### 2.2 Case 2. Naapurihuoneiston tulipalon palokaasut olivat kulkeutuneet huoneistojen välisen betoniseinän läpi asuntoon

Uudenvuoden yönä ilotulitusraketti lensi kerrostalohuoneiston ikkunan läpi olohuoneen sohvalle sytyttäen sen tuleen. Tulipalossa paloi sohvan lisäksi yksi kaappi. Onnettomuuden jälkeen tulipaloasunto puhdistettiin ja vaurioituneet seinä- ja kattopinnat korjattiin sekä lopuksi kapseloitiin tiiviillä maalikerroksella. Naapurihuoneistoon ei tehty mitään korjauksia.

Savun haju ilmaantui kuitenkin kesän aikana sekä paloasuntoon että naapurihuoneistoon aiheuttaen naapurihuoneiston asukkaalle voimakkaita oireita. Asunnot tarkastettiin loppuvuodesta, jolloin molemmissa huoneistoissa oli todettavissa selkeä savun haju. Naapurihuoneiston sisäilmamittauksissa todettiin vuosi tulipalon jälkeen korkeat TVOC-pitoisuudet ( $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pääosa yhdisteistä koostui  $150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$  kiehuvista substituoiduista sykloheksaaneista ja muista alifaattisista hiilivedyistä. Nämä yhdisteet ovat tyypillisiä vaahtomuovin palamistuotteita.

Huoneistot korjattiin seuraavan talven aikana. Korjaustyön aikana todettiin, ettei huoneistojen välisessä seinässä tai sen liittymissä ollut sellaisia rakoja, josta ilma voisi suoraan virrata huoneistosta toiseen. Todennäköisesti palo- ja savukaasut varastoituivat huoneistojen väliseen betoniseinään ja kulkeutuivat seinän sisältä edelleen naapurihuoneiston puolelle.

Tulipalon kärsinyt huoneisto korjattiin siten, että vanhat maali- ja tasoitekerrokset poistettiin, huoneiston lämpötila nostettiin viikon ajaksi  $+ 30 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaan, jotta rakenteiden sisään varastoituneet yhdisteet haihtuisivat nopeammin pois. Tämän jälkeen huoneistossa suoritettiin hajunpoisto, pinnat tasoitettiin ja maalattiin uudelleen kapseloivalla maalilla. Naapurihuoneistossa suoritettiin hajunpoisto sekä tulipalonpuoleisen betoniseinän maalaus kapseloivalla maalilla. Taulukossa 1 on esitetty eräitä naapurihuoneiston sisäilmamittausten tuloksia ennen uusia korjauksia, n. 3,5 kuukautta ja 7 kuukautta korjausten jälkeen.

*Taulukko 1. Eräitä sisäilmamittausten tuloksia ennen ja jälkeen korjausten.*

Olohuoneen sisäilma	Ennen korjausta	3,5 kk korjauksesta	7 kk korjauksesta
TVOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	4000	350	250
Aromaattiset yhdisteet ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	166	9	22
Alkaanit ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1750	57	1,6
Karboonyylit ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	325	1,3	27

Toimenpiteillä onnistuttiin poistamaan savun haju huoneistoista sekä vähentämään sisäilman VOC-pitoisuudet tavanomaiselle tasolle.

### 2.3 Case 3. Huonekalun homeenestoaine emittoituu asunnon sisäpintoihin

Asuntoon ostettiin syksyllä uusi kiinalaisvalmisteinen nojatuoli. Seuraavana keväänä alkoivat asukkaiden iho-oireet. Noin vuoden päästä oireilun alkamisesta todettiin oireilun syyksi muiden vastaavien tapausten takia huonekalussa käytettyä homeenestoainetta, dimetyylifumaraattia (DMF). Suomalainen ylilääkäri Tapio Rantanen selvitti yhteyden huonekalujen sisältämän DMF:n ja ihmisten herkistymisen välillä [3]. Nojatuoli palautettiin maahantuojalle. Oireet lievenivät, mutta oireilua esiintyi varsinkin poistetun nojatuolin paikan läheisyydessä. Huoneiston kalusteet ja tekstiilit, imuroitiin, tuuletettiin ja pestiin, mutta näillä toimenpiteillä ei saatu tilannetta parantumaan. Kesällä asunnon sisäilmasta mitattiin VOC-pitoisuudet. Sisäilmasta löytyi pieni määrä dimetyylifumaraattia, sekä ala- että yläkerran näytteistä mitattiin  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pitoisuudet. Huoneiston tekstiileistä otettiin pöly- ja materiaalinäytteitä, niissä ei todettu DMF-yhdistettä.

Huoneiston puhdistustoimenpiteitä jatketaan: pinnat puhdistettiin, kalusteet uusittiin, matot ja verhot vaihdettiin, portaikon kokolattiamatto poistettiin, yläkerran tapetit poistettiin ja tilalle asennettiin paneli ja lisäksi muut tekstiilit pestiin. Noin puoli vuotta myöhemmin uusittiin sisäilmamittaukset, dimetyylifumaraattipitoisuus oli laskenut alakerrassa  $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja noussut

yläkerrassa  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Syytä pitoisuuden nousuun yläkerrassa ei tiedetä. Asukkaiden oireet ovat vähentyneet, mutta eivät kokonaan poistuneet.

Tuoteturvallisuusdirektiivin mukaisesti EU:n komissio on päättänyt kieltää DMF:n tuotteissa. Aine on biosidina EU:ssa kielletty, mutta sitä on tullut maahantuotujen esineiden mukana. Kielto astui voimaan 1.5.2009 ja on voimassa vuoden. On oletettavaa, että aineesta tehdään REACH-asetuksen liitteen XV mukainen rajoitusehdotus.

### 3. Yhteenveto

Rakennus voi kontaminoitua monella tavoin elinkaarensa aikana vahinkojen tai onnettomuuksien seurauksena. Puhdistamistoimenpiteissä tarvitaan erikoisosaamista ja pitkäjänteisyyttä, ne eivät usein onnistu yhdellä kertaa vaan tarvitaan useita, erilaisia käsittelyjä. Jos epäpuhtauksia ei saada ajoissa poistettua, voivat asukkaat herkistyä, oireilla tai sairastua vakavastikin. Usein puhdistustyössä onnistutaan hyvin ja asukkaiden oireilu vähenee merkittävästi tai poistuu kokonaan.

### Lähdeluettelo

- [1] <http://www.heli.fi/content/Liitteet/Homesiivousohjeet.pdf?from=-6316307349346087>
- [2] <http://www.epa.gov/mercury/spills/>
- [3] Rantanen Tapio, The Cause of Chinese sofa/chair dermatitis epidemic is likely to be contact allergy to dimethylfumarate, a novel potent contact sensitizer, British Journal of Dermatology 159 (1) 2008, pp 218-221.

# Välipohjarakenteiden vanhojen täyttöjen vaikutukset sisäilmassa

Harri Korkalainen  
Kuopion kaupunki, Tilakeskus

## Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin vanhan rakennuksen välipohjaontelon täyttömateriaalien mikrobiologisten olosuhteiden vaikutusta sisäilman laatuun. Tutkimus suoritettiin mikrobinäyttein ja paine-eromittauksin. Tutkimuksen perusteella materiaalinäytteestä todetun mikrobilajiston perusteella vaurioituneeksi tulkittava materiaali ei välttämättä ole sisäilman laatua heikentävä tekijä. Orgaanisten materiaalien kyseessä ollessa lieneekin usein kyse materiaalin luonnostaan sisältämästä mikrobilajistosta, joka laboratorio-olosuhteissa alkaa kasvaa, mutta rakenteessa ollessaan ei aiheuta välttämättä ongelmia. Paine-eromittausten perusteella todettiin, että henkilökunnan kokemat oireet painottuivat niihin tiloihin jotka olivat ylipaineisia. Ylipaineisten tilojen todettiin aiheuttavan myös välipohjaonteloon ylipaineen, joka vaikutti epäpuhtauksien kulkeutumiseen viereisiin tai ylä- tai alapuolella sijaitseviin alipaineisiin tiloihin.

Rakenteiden tiivistämiskorjauksilla voidaan päästä hyvään lopputulokseen myös sisäilman laadun kannalta, kun tiivistäminen suunnitellaan huolella ja laadunvarmistukseen ja jälkiseurantaan panostetaan. Korjauksen vaikutusta sisäilman laatuun arvioitaessa tulee tarkastella kaikkien eri osa-alueiden vaikutuksia, ei pelkästään yksittäistä rakennus- tai taloteknistä osa-aluetta.

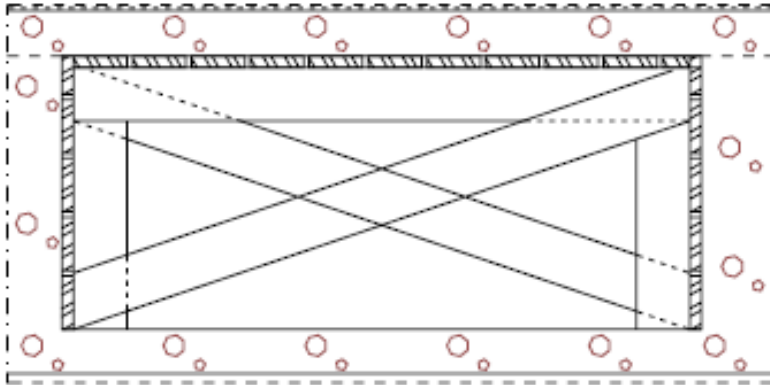
## 1. Johdanto

Sisäilmatutkimukset ja niihin liittyvät mikrobitutkimukset ovat viime vuosina nousseet yhä merkittävämmäksi tekijäksi rakennusten ja rakenteiden korjaustapaa määritettäessä. Mikrobinäytteiden ottamiseen ja mahdollisen vaurion arvioimiseen liittyy kuitenkin aina myös epävarmuustekijöitä. Erityisesti tämä koskee vanhoja orgaanisia täyttömateriaaleja kuten purua, sammalta ym., joista laboratoriotutkimuksissa löytyy lähes poikkeuksetta kosteusvaurioindikaattorimikrobeja. Usein on epäselvää, onko rakenteessa oleva tilanne mikrobikasvuston osalta todella sama kuin laboratoriossa tutkitussa näytteessä? Pelkän materiaalinäytteen laboratoriotutkimuksen perusteella sisäilmavaikutusta arvioitaessa täyttömateriaalit olisivat vaurioituneita ja kelvottomia rakenteeseen, vaikka ne olisivat olleet rakenteessa kuivissa olosuhteissa jo sata vuotta.

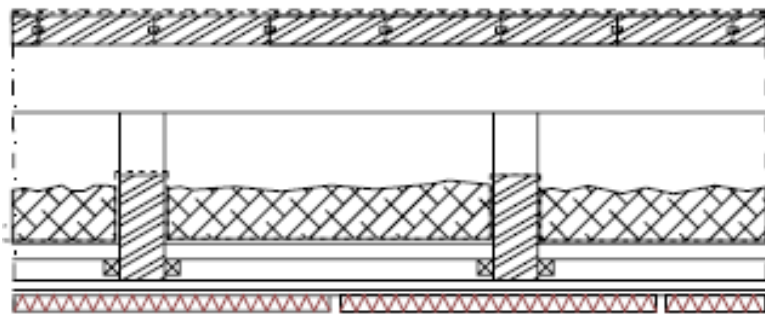
Tutkimuksessa selvitettiin kohderakennuksen välipohjaonteloissa olevien täyttömateriaalien mikrobilajistoa materiaalinäyttein ja ilmanäyttein sekä sisäilman mikrobilajistoa. Tarkoituksena oli selvittää, päätyvätkö materiaalinäytteessä mahdollisesti esiintyvät mikrobilajistot sisäilmaan. Mikrobitutkimusten lisäksi tehtiin paine-eromittauksia ilmanvaihdon normaalikäytöllä ja ilmanvaihdon ollessa pois päältä.

## 2. Rakenteet ja tutkimusperiaate

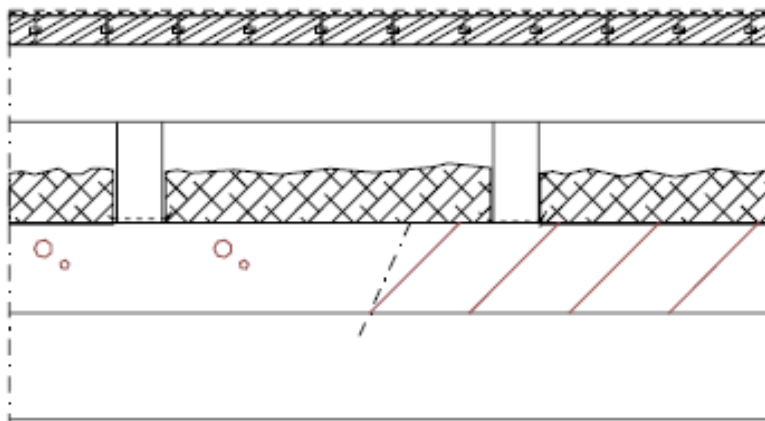
Kohderakennuksessa on useita erityyppisiä välipohjarakenteita. Näistä tutkittaviksi valittiin kolme erilaista rakennetta, joista kaksi oli pääosin puurakenteisia ja yksi betonirakenteinen. Välipohjarakenteiden periaatteet on esitetty kuvissa 1-3.



Kuva 1. Betonirakenteinen kaksoislaattapalkisto, välitilassa muottilaudoitukset paikallaan.



Kuva 2. Puurakenteinen välipohja, täyttönä purua, sammalta, hiekkaa, tiiltä ym.



Kuva 3. Puurakenteinen tiiliholvin päälle rakennettu välipohja, täyttönä pääosin sammalta.

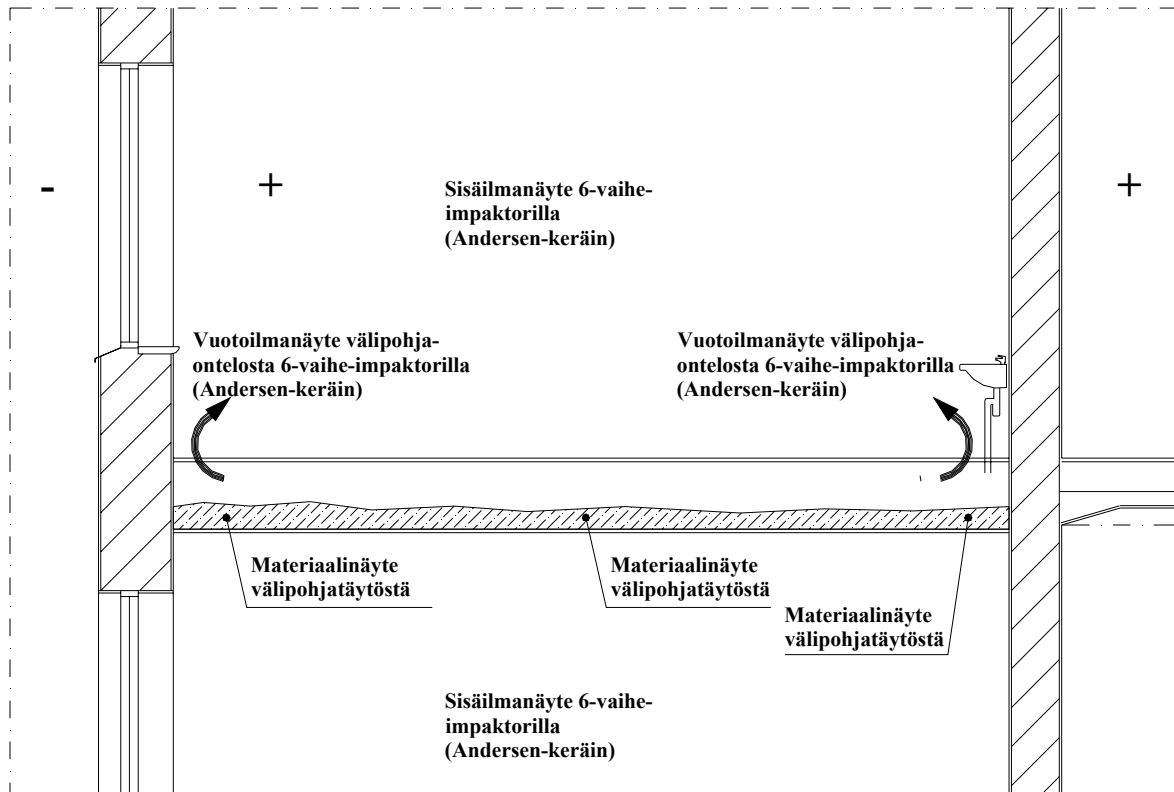
Mikrobien kulkeutumisen selvittämiseksi otettiin ilmanäytteitä 6-vaiheimpaktorilla (Andersen-keräin) tutkittavien tilojen sisäilmasta sekä välipohjaontelosta. Lisäksi otettiin materiaalinäytteitä välipohjien täyttömateriaaleista. Materiaalinäytteiden avulla pyrittiin selvittämään materiaalin mahdollista vaurioituneisuutta. Välipohjaontelon ilmanäytteen tavoitteena oli selvittää, löytyykö välipohjaontelon ilmatilasta vastaavia mikrobilajeja kuin materiaalinäytteestä, jolloin ko. ilma



voisi olla haittatekijä päätyessään sisäilmaan. Kyseisiä välipohjaontelon ilmanäytteitä kutsutaan jatkossa vuotoilmanäytteiksi. Sisäilmanäytteiden tarkoituksena oli selvittää, ovatko välipohjan materiaalissa tai välipohjaontelon ilmatilassa mahdollisesti olevat mikrobiepäpuhtaudet päätyneet sisäilmaan.

Vuotoilmanäytteiden ja materiaalinäytteiden tutkimuskohdiksi valittiin

- ulkoseinän vierusalue, jossa lämpöolosuhteiden muutokset voivat muuttaa myös kosteusolosuhteita.
- keskilattia, jossa lämpö- ja kosteusolosuhteiden voi olettaa pysyvän vakiona.
- vesipisteen vierus, jossa on riski käyttövesi- ja viemärivuodoille.



Kuva 4. Mikrobitutkimusten toteutus.

### 3. Mikrobitutkimusten tulokset

Mikrobitutkimusten tulosten perusteella oli todettavissa, että vaikka yksittäisen materiaalinäytteen perusteella kyseisessä kohdassa vaikuttaa olevan vaurio (”viittaa vaurioon” tai ”vahva viite vauriosta”), välipohjan ilmatilassa ei aina esiinny lainkaan kosteusvaurioon viittaavaa lajistoa, eikä myöskään ko. huoneen ilmatilassa. Osassa välipohjien ilmatiloja esiintyi kosteusvaurioon viittaavaa lajistoa, mutta lajisto oli kuitenkin paikoin erilaista kuin materiaalinäytteissä. Joissakin tiloissa materiaali- ja vuotoilmanäytteissä esiintyi samaa kosteusvaurioindikaattorilajistoa, näissäkään tapauksissa sisäilmanäytteissä ei esiintynyt lainkaan kosteusvaurioindikaattorimikrobeja.

Kokoamalla kaikkien mikrobianalyysien tulosten kosteusvaurioindikaattorimikrobit yhteen taulukkoon 1, voitiin tarkastella materiaalista vuotoilmaan tai sisäilmaan päätyvää mikrobilajistoa. Näistä löytyi yhteneväisyyksiä luokan 3, 4 sekä 7 osalla. Vuotoilmassa ja

sisäilmassa yhteneväisiä lajeja on ollut kuitenkin vain luokassa 3, kyseinen *Eurotium* -home esiintyi kuitenkin myös ulkoilmanäytteessä. Minkään tilan osalla ei ollut yhteneväisyyttä materiaalinäytteen sisältämän kosteusvaurioindikaattorilajiston ja sisäilman kosteusvaurioindikaattorilajiston välillä. *Penicilliumin* osalta tilanne on erilainen.

Ulkoilmanäytteen ja sisäilmanäytteiden *Penicilliumin* pitoisuudet olivat suuruusluokkaa 10 pmy/m<sup>3</sup>, kuten tilan 3 välipohjan ilmatilan *Penicilliumin* pitoisuudetkin. Tilan 4 välipohjan ilmatilan *Penicilliumin* pitoisuudet olivat suuruusluokkaa 100 pmy/m<sup>3</sup> (10-kertainen vrt ulkoilma) ja tilojen 6 ja 7 välipohjien ilmatilojen suuruusluokkaa 1000 pmy/m<sup>3</sup> (100-kertainen vrt ulkoilma).

*Taulukko 1. Kosteusvaurioindikaattorilajistojen ja Penicilliumin esiintyvyyksien yhteenveto eri ilojen mikrobiäytteisä.*

S= Sisäilmanäyte; V= välipohjan ilmasta otettu näyte; M= materiaalinäyte välipohjan sisältä  
X = esiintyi, - ei esiintynyt, O = esiintyi sekä sisä-, että ulkoilmassa

luokka	1			2			3			4			5			6			7			8	
	S	V	M	S	S	V	M	S	V	M	S	S	V	M	S	S	V	M	S	V	M	S	M
A. niger <sup>o</sup>	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A. penicillioides*	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A. sydowii*	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A. ustus <sup>o</sup>	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A. versicolor*	-	-	-	-	-	x	x	-	x	-	-	-	x	-	-	x	-	-	x	x	-	-	-
Aureobasidium* <sup>o</sup>	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chaetomium*	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eurotium*	-	-	-	-	O	x	-	-	-	-	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	O	-
Paecilomyces*	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Penicillium	O	-	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	-	O
Streptomyces*	-	-	x	-	-	-	x	-	x	x	-	-	x	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-
Ulocladium*	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
hiivat, punainen <sup>o</sup>	-	-	-	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A= Aspergillus,

\* lajeja, joita esiintyi yli 5 % kosteusvauriokohteissa (Reiman ym. 2005)

<sup>o</sup> indikaattorimerkitys vielä avoin

## 4. Ilmanvaihto ja paine-erot

### 4.1 Tilojen paine-erot ulkoilmaan ja toisiinsa

Kiinteistön ilmanvaihto on suunniteltu siten, että tilat olisivat hieman alipaineisia suhteessa ulkoilmaan. Pääosin näin myös oli, mutta kolmessa eri tilassa todettiin, että tila oli ylipaineinen. Kaksi näistä ylipaineisista tiloista oli myös niitä, joissa henkilökunta oli kokenut sisäilmaan liittyviä ongelmia. Yhdessä tilassa ylipaine oli erityisen voimakas, paine-ero ulkoilmaan nähden oli ka. + 28,5 Pa.

Huonetilat olivat yleensä alipaineisia käytävätiloihin nähden, jolloin virtaussuunta on käytävätiloista luokkatiloihin päin. Poikkeuksena oli yksi ulkoilmaan nähden huomattavan ylipaineinen tila, joka oli ylipaineinen myös käytävätilaan nähden. Ensimmäisen ja toisen kerroksen ulkoilmaan nähden ylipaineiset tilat olivat kuitenkin käytävätilaan nähden alipaineisia.

## 4.2 Paine-erot välipohjien ja huonetilojen välillä

Ilmanvaihdon ollessa pois päältä paine-ero välipohjan ilmatilan ja huonetilan välillä oli hyvin pieni. Puuvälipohjat olivat yleisesti ottaen hieman alipaineisia yläpuoliseen tilaan nähden (-0,2 Pa-0,0 Pa), alapuolisen tilan kattoon verrattuna paine-eroa ei juuri ollut tai ontelotila oli hieman alipaineinen. Betonivälipohjien osalla välipohja oli ulkoseinän vieressä hieman alipaineinen ja väliseinän vieressä hieman ylipaineinen sekä ylä- että alapuoliseen tilaan nähden.

Ilmanvaihdon ollessa normaalikäytöllä tilanne muuttui yleensä niin, että paine-ero välipohjaontelon ja tilojen välillä suureni ja välipohjaontelo oli edelleen alipaineinen suhteessa sekä ylä- että alapuoliseen tilaan. Ylipaineisten tilojen osalla tilanne muuttui kuitenkin siten, että mikäli ylipaineisen tilan ylä- tai alapuolella oli alipaineinen huonetila, muuttui myös välipohjaontelo ko. tilaan nähden ylipaineiseksi.

## 4.3 Yhteenveto paine-eromittauksista

Paine-eromittausten tuloksista voidaan todeta, että ilmanvaihdon säädöllä on suuri vaikutus välipohjien mahdollisten mikrobikasvustojen tai muiden epäpuhtauksien päätyemiselle sisäilmaan. Kun ilmanvaihto on säädetty oikein ja kaikki tilat ovat hieman alipaineisia, pysyy myös välipohjaontelo hieman alipaineisena, eikä ilmavirtausta välipohjaontelosta huonetilaan välttämättä tapahdu. Mikäli välipohjaontelo muodostuu ylipaineiseksi, ovat ilmavirtaukset alatai yläpuoliseen huonetilaan todennäköisiä huonosti tiivistettyjen läpivientien kautta. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei selvitetty yläpohjan rakennetta eikä paine-eroja, mutta suunnitteluun liittyen tehtiin havaintoja ja selvityksiä myös yläpohjarakenteesta. Näissä selvityksissä todettiin mm. huonosti tiivistettyjä yläpohjan läpivientejä ilmanvaihtoputkien osalla.

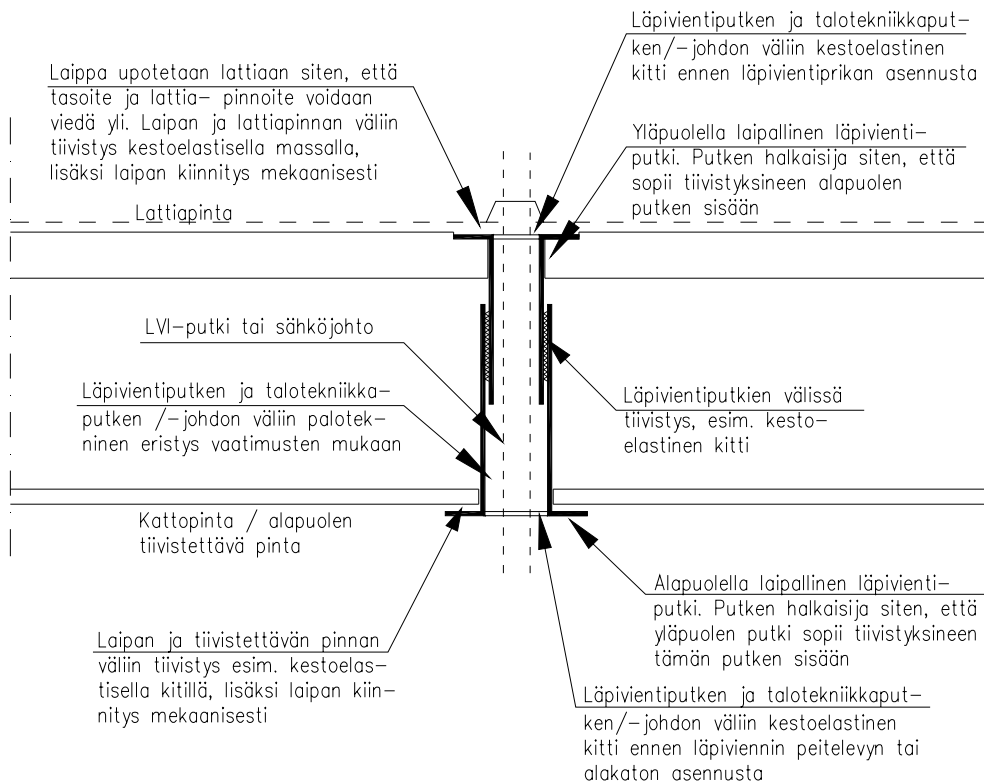
## 5. Rakenteellinen tiivistäminen korjaustoimenpiteenä

Tiivistäminen korjaustoimenpiteenä tulkitaan usein tilapäiseksi korjaustoimenpiteeksi, joka suoritetaan erilaisilla elastisilla kittauksilla rakenteisiin kajoamatta. Tiivistäminen voidaan kuitenkin toteuttaa hyvin myös pitkäaikaisena korjausratkaisuna, kun tiivistettävät kohteet suunnitellaan huolellisesti.

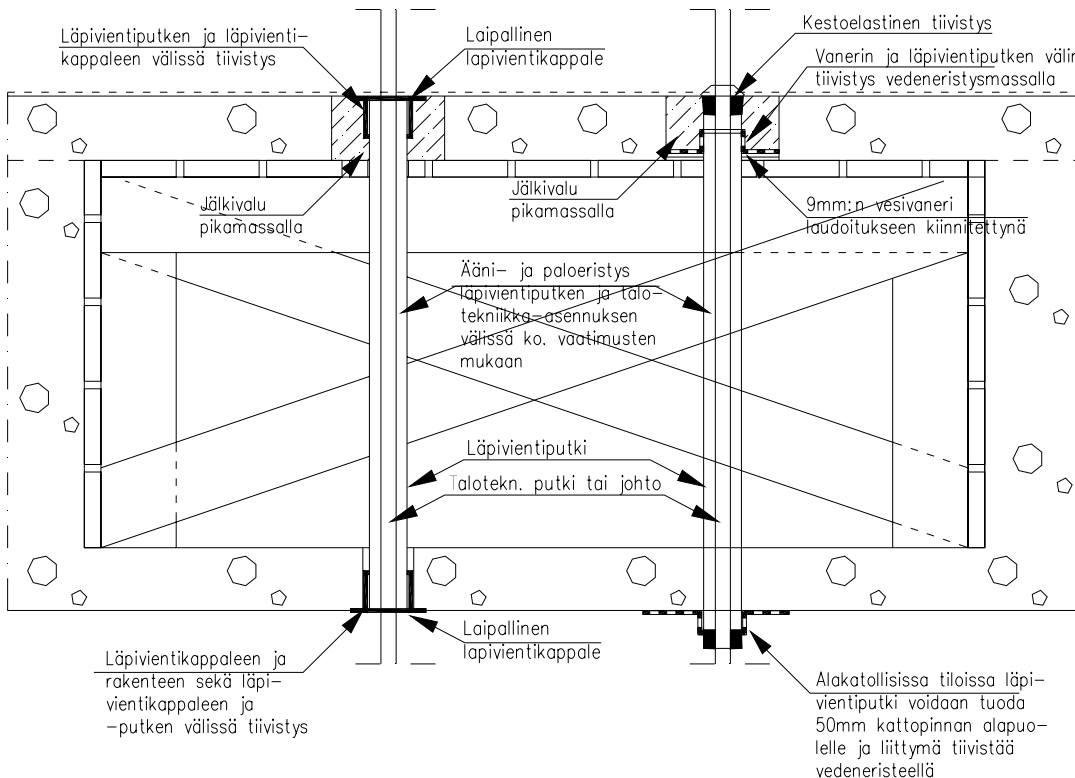
Tämän tutkimuksen perusteella materiaalinäytteissä oleva mikrobilajisto oli pääosin erilaista kuin sisäilmassa sekä usein myös erilaista kuin välipohjaontelossa. Materiaalinäytteiden mikrobitulokset vaikuttaisivat tämän perusteella antavan rakenteen kunnosta huomattavasti heikomman kuvan, kuin sen vaikutukset sisäilmaan ovat. Tältä kannalta tarkasteltuna huolellisella tiivistämisellä voidaan päästä hyvään lopputulokseen, kun korjaamiseen yhdistetään ilmanvaihdon oikea säätö.

Kuvassa 5 on esitetty periaatteellinen ratkaisu, jolla läpiviennin tiiveys voidaan saavuttaa. Tiivistykseen liittyy aina erillinen läpivientikappale, jossa olevat laipat voidaan tiivistää lattia- ja kattopintoihin. Ylä- ja alapuolen putkidimensiot valitaan siten, että putket sopivat sisäkkäin ja ne voidaan tiivistää. Tiivistäminen voidaan suorittaa kestoelastisella kitillä tai myös kumitiivistein, mikäli valmiita tiivisteitä ja putkikokoja on käytävissä. Reikien teko ja läpivientikappaleen asennus sekä tiivistys on järkevää toteuttaa rakennusurakassa. Talotekninen asennus toteutetaan vasta, kun läpivientiputki on paikallaan ja sen tiiveys on varmistettu.

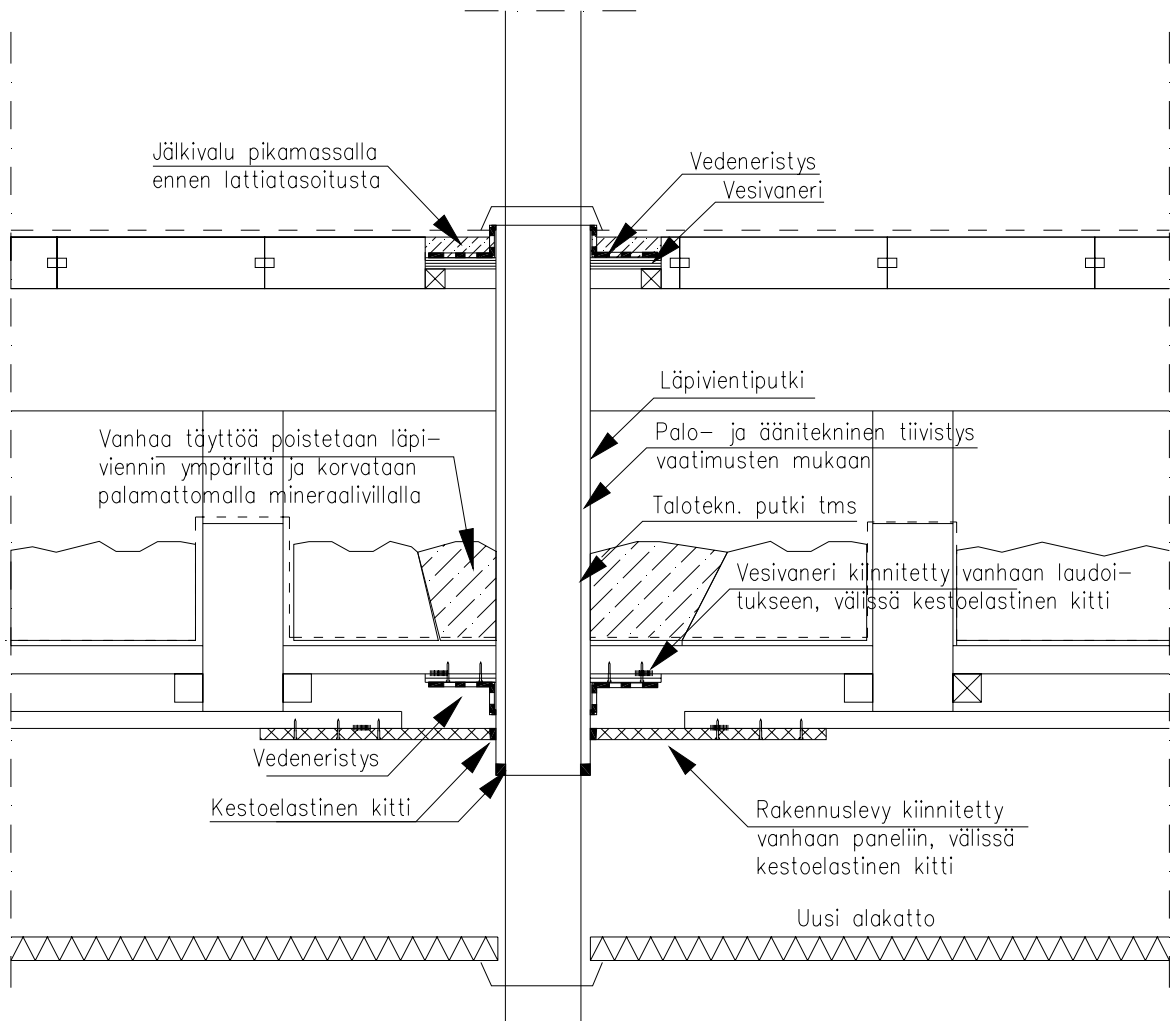
Kuvissa 6 ja 7 on esitetty tutkimuskohteen korjaussuunnittelun yhteydessä laadittuja rakennedetaljeja läpivientien tiiveyden varmistamiseksi.



Kuva 5. Läpiviennin tiivistämisen toteutustapa (periaatedetalji).



Kuva 6. Talotekniikan läpiviennin tiivistäminen, betonivälipohja.



Kuva 7. Talotekniikan läpiviennin tiivistäminen, puuvälipohja.

## 6. Riskitarkastelu

Valittuihin korjausratkaisuihin liittyy aina teknisiä, taloudellisia sekä sisäilmastollisia riskejä. Tekniseltä kannalta tarkasteltuna tiivistäminen korjaustapana vaatii huolellista suunnittelua ja laadunvarmistusta sekä valvontaa. Taloudelliselta kannalta tiivistäminen on yleensä rakenteiden uusimista edullisempi vaihtoehto, mutta huolimaton korjaaminen voi aiheuttaa myös uusintakorjaamista. Sisäilmaston laadun kannalta valitulle korjaustavalle voidaan tehdä riskitarkastelu esimerkiksi kosteus- ja homevaurioihin liittyvän sovelletun BS8800 riskitaulukon avulla [1]. Eri korjausvaihtoehtojen monialaisella riskitarkastelulla voidaan tarkastella kullakin korjaustavalla saavutettavia hyötyjä suhteessa taloudelliseen panostukseen ja sisäilmaston laatuun.

## 7. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa todettiin, että vaikka materiaalinäytteiden perusteella vaikuttaisi siltä, että kaikki materiaalit ovat vaurioituneita ja olisi uusittava, kokonaisuutena tarkastellen tähän ei näytä olevan todellista tarvetta. Hyvään lopputulokseen voidaan päästä keskittämällä korjaukset todellisiin riskipaikkoihin ja huolehtimalla rakentamisen ja talotekniikan eri osa-alueiden yhteensovittamisesta.

Rakennuksien korjauksia suunniteltaessa on lähtötilanteen selvittämiseksi hyvä tehdä riittävä määrä myös mikrobiologisia tutkimuksia. Nämä tutkimukset on kuitenkin syytä suunnitella huolella ja jo tutkimusvaiheessa miettiä, mikä on kokonaisuuden kannalta olennaista ja tarpeellista tietoa. Satunnaisesti otetut näytteet voivat herättää enemmän kysymyksiä kuin antaa vastauksia, erityisesti käyttäjien keskuudessa, jotka tarkastelevat asiaa oman turvallisuutensa ja terveytensä kannalta. Erityisesti tämä korostuu, kun siirrytään tarkempiin tutkimusmenetelmiin (PCR), joilla saadaan näytteistä entistä enemmän tietoa, mutta tulkinnasta ei ole riittävästi ohjeita eikä kokemusta.

Rakennesuunnittelulla ja rakennedetaljeilla on suuri merkitys korjausten onnistumisen kannalta, erityisesti tiivistyskorjauksia tehtäessä. Oikein toteutetuilla tiivistystoimenpiteillä voidaan estää ilmavuodot ja niiden mukana rakenteista sisäilmaan kulkeutuvat partikkelit, itiöt sekä ilman mukana kulkevat aineenvaihduntatuotteet. Mahdollisesti rakenteiden läpi tulevien emissioiden aiheuttama haitta jää tällöin murto-osaan lähtötilanteesta ja ilmanvaihdon toimiessa normaalisti ilman laadun voi olettaa pysyvän turvallisena ja terveellisenä. Hyvään lopputulokseen pääsemiseksi tiivistykseen kuuluu suunnittelun lisäksi myös laadunvarmistus esimerkiksi merkkiainetutkimuksena [2]. Kokonaiskorjauksen onnistumisen ja hyvän sisäilman laadun varmistamiseksi myös seuranta korjaustoimenpiteiden jälkeen on tärkeää.

## Lähdeluettelo

- [1] Reiman M. (2008) Biologisten tekijöiden riskinarviointi, sisäilmaongelmat. Rakennusterveysasiantuntijakoulutus, Kuopion yliopisto. Luentomoniste.
- [2] Grönholm J. (2008) Rakenteiden tiivistyskorjaukset sisäilmaongelmien torjunnassa. Kuopion yliopisto, tutkimuksia ja selvityksiä 11/2008

# Homeen estäminen rakennuksissa – kosteudenhallinnan menettelytavat suunnittelusta käytäntöön

Ensio Laaksonen  
Oy I & I, Ideas & Innovations Ltd

## Tiivistelmä

Ainoa oikea ratkaisu homeongelmiin on, että näitä ongelmia ei pääse rakennuksissa lainkaan syntymään. Homeongelma rakennuksissamme on ollut useimmiten väärässä käsittelyvaiheessa, vasta vaurion tapahduttua. Näitä selvityksiä ja tutkimuksia on hyllymetreittäin. Hometta saamme vain silloin, kun homeenmuodostumiskohdassa seuraavat olosuhteet ovat olleet (usein vain) lyhyehkön ajan paikalla yhtä aikaa: **lämpöä, happea, orgaanista ainetta sekä kosteutta**. Pieneliöillä voi olla myös myös roolinsa homeen syntymisessä. Lämpöä ja happea on käyttörakennuksissamme aina. Vaikka muu orgaaninen aine olisi etäällä, niin orgaanista pölyä löytyy tai syntyy ainakin vähäisessä määrin. Homeen estämisen rooliin jää vain **kosteus**. Meidän on osattava toimia veden ja kosteuden kanssa niin, ettei sitä koskaan ole rakennuksissamme haitallisessa määrin ja haitallisen kauan. Hometta ei synny, ellei ole kosteutta.

## 1. Johdanto

**Homeen estäminen rakennuksissa – kosteus kuriin.** Tällä työnimellä RIL:ssä ollaan tekemässä opaskirjaa. Tässä luennossa on esillä muutamia kohtia tuosta kirjasta. Kirjan sisältö voidaan jopa pelkistää tuohon työnimeen. Toiminnallisesti tämän pitäisi riittää niin ohjeeksi kuin määräyksiksi. Kun kosteus on rakennuksessa hallinnassa, hometta ei voi muodostua.

1990-luvun lopulle Suomen rakentamismääräyskokoelmassa (RakMk) Veden- ja kosteudeneristysten määräykset (C2) olivat vain 1,5 sivun mittaiset. Tämä määräysteksti alkoi:

*”Rakennuksen on tarkoituksenmukaisesti suojattava sisätiloja veden ja kosteuden haitallisilta vaikutuksilta ja tehtävä terveellinen sisäilmaston ylläpitäminen mahdolliseksi.”*

Muutamin lyhyin kappalein puretaan C 2:ssa tuota yleistä määräystä. Silloinen veden- ja kosteudeneristysmääräys yhdistettynä rakennusalan luonnontieteellisen koulutuksen antamaan kyseenalaistavan tiedon omaksumiseen periaatteessa riitti kosteuden pitämiseen kurissa rakennuksissamme. Toiminnallisuudessaan edellä siteerattu on kaiken kattava, mutta sen toteutumista rakennushankkeeseen ryhtyvät eivät ole kyenneet valvomaan.

Vaan eivät näitä perusohjeita riittäneet. Niin, rakennusalalla koettiin tarvittavan pienipiirteiset veden- ja kosteudeneristysmääräykset. Ne tulivat voimaan yli 10 vuotta sitten.

Nykyinen C 2 on itsenäään lähes 20 sivua. Lisäksi ympäristöministeriö on julkaissut laajan opasaineiston. Nykyisen C 2:n olennainen ja voimme myös sanoa olennaisin vaatimus on erittäin kattava ja edellisen C 2:n hengen mukainen:

*”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei siitä aiheudu sen käyttäjille tai naapureille hygienia- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuksen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee normaalilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöajan ajan.”*

Mitä on tapahtunut uusien määräysten yli 10-vuotisella taipaleella? Mediasta mutu-tuntumalla on saanut kuvan, että kosteus- eli homevauriot edelleen lisääntyvät. Homerakennusten purkamiset tuntuvat yleistyvän.

RIL:n Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet RIL 107-1976 oli 73-sivuinen, kun taas RIL 107-2000 oli jo 211 sivun laajuinen.

Ei määräysten pituus tai oppaiden määrä ole ratkaisun avain. Tarvitaan asennemuutosta. Kosteuden ja veden liikkumiseen liittyvät luonnonlait ovat helposti ymmärrettävissä. Kaiken kaikkiaan ihmiskunnan tärkein materiaali on vesi.

Ei C 2 eikä RIL 107 ota kantaa kuivien tilojen kosteusongelmiin. Ei ehkä tarvitsisikaan, mutta koetut vauriorakennukset kertovat vääjäämättä muuta.

Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL) 117 § on rakennus- ja rakennesuunnittelun sekä kiinteistönpidon lähtökohta. Tuon MRL:n 117 §:n **kaikkien kuuden olennaisen vaatimuksen**

- rakenteiden lujuuden ja vakauden,
- paloturvallisuuden,
- hygienian, terveyden ja ympäristön,
- käyttöturvallisuuden,
- meluntorjunnan sekä
- energiatalouden ja lämmöneristyksen

pitää **toteutua yhtä aikaa koko rakennuksen elinkaaren ajan.**

## 2. Rakennushankkeen kosteudenhallintasuunnitelma

Rakennushankkeen kosteudenhallinta on katkeamaton ja tietoa kumuloiva laatu prosessi, joka alkaa rakennushankkeeseen ryhtyvän laatumääritteistä hankesuunnitteluvaiheessa ja tarkentuu varsinaisen suunnitteluprosessin kuluessa. Kosteudenhallintasuunnitelmaa toteutetaan työmaavaiheen lisäksi rakennuksen käytössä ja huollossa.

Kosteudenhallinnan suunnitelman perusrakenne:

- rakennushankkeeseen ryhtyvän kosteudenhallinnan tavoitetaso ja tarkistuslistat
- kosteusriskien kartoittaminen ja riskittömien rakenteiden suunnittelu sekä rakennushankkeeseen ryhtyvän tarkistuslistan edellyttämät tehtävät (suunnittelijat tekevät)
- rakenteiden kuivumisaika-arviot (rakennesuunnittelijan tehtävä)
- työmaaolosuhteiden kosteudenhallinnan suunnittelu (työmaamestarin tehtävä)
- kosteusmittaussuunnitelma (työmaamestari yhdessä henkilösertifioidun kosteudenmittaajan kanssa)
- organisointi, seuranta ja valvonta (työmaamestari)
- rakennuksen käytön aikainen kosteudenhallinta (rakennuksesta vastaava, huoltokirja).



Suurin osa kosteusvaurioista aiheutuu

- vääristä materiaali- ja rakennusratkaisuista
- rakennusvirheistä
- LVISA-laitteiden suunnittelu-, toteutus- ja säätövirheistä tai väärästä käytöstä tai huollon puutteesta.

Rakennustyömaalla kaikkien osapuolten tulee tiedostaa ja huolehtia vastuualueeseensa kuuluvat kosteusteknisesti tärkeät seikat sekä ilmoittaa havaitsemistaan kosteusriskeistä ja -vaurioista välittömästi työmaan johdolle. Sopimusasiakirjoissa tulee sopia eri osapuolten tehtävät ja vastuut kosteudenhallinnan osalta.

Kosteudenhallinnan suorittamisesta, poikkeusolosuhteista, vesivahingoista, mittaustuloksista ja rakenteiden päällystämispäätöksistä dokumentoidaan tarkoituksenmukaisissa asiakirjoissa.

Koko rakennushankkeen elinkaaren mittainen kosteudenhallinnan suunnitelma ja sen itse ohjaava noudattaminen eliminoi suuren osan kosteus- ja edelleen homeongelmista.

### 3. Kiinteistönpito(on)

Jos/kun rakennuksesta löytyy hometta, kiinteistönpidossa on tehty laiminlyöntejä, yleensä suuria virheitä, joista seuraa aina ylimääräisiä kustannuksia ja mikä pahinta: terveysongelmaketju. Nämä terveysongelmat päiväkoti- tai koululapsi voi joutua viemään pitkälle aikuisuuteen, ehkä koko eliniäksi. Moni aikuinen on työpaikassaan altistunut homeitiöille jopa työkyvyttömyyteen asti. Miksi kiinteistönpidossa otetaan tällaisia riskejä ja vastuita? Kosteusvauriohometta rakennuksiimme ei synny ilman ihmisten kiinteistönpidon laiminlyöntejä.

Rakentamiseen ryhtyvä vastaa rakennuksesta esisuunnittelusta rakentamisen kautta käyttöön. Hän ei saa hyväksyä vääriä suunnitelmia eikä väärää rakennustyötä. Kun tämä – esimerkiksi kunnan tilakeskus – on ottanut vastaan vaikka koulurakennuksen, käytön vastuu on luonnollisesti omistajan eli tässä tapauksessa kunnan.

Homeen muodostumisen mahdollisuus estetään hyvällä suunnittelulla ja hyvällä käyttö- ja huolto-ohjeen – *huoltokirjan* – sisältökohtien noudattamisella. Jokainen muutos – väreissä, äänissä, raon muodostumisessa, missä tahansa – on talon toiminnoista huolehtivalle hälytyskello, joka on otettava vakavasti. Ennakointi on parasta ja säästävintä kiinteistönpitoa.

Rakennusvaihe on niin ajallisesti kuin rahallisesti korkeintaan muutama prosentti rakennuksen koko elinkaaren aikaisista kustannuksista. Ylivoimaisesti tärkeintä on joka-aikainen ennakoiva kiinteistönpito. Miten tahansa laskien kiinteistönpidon osuus kosteus- ja homevaurioista on valtaosa. Kun ajattelemme, että rakennushankkeeseen ryhtyvä on hyväksynyt valmistuneen rakennuksen, kaikki vastuu siirtyy omistajalle ja edelleen omistajaketjulle. Rakentaminen on tärkeä ja välttämätön vaihe mutta vain kiinteistönpidon alkuaste.

Kaikesta rakennusprojektissa vastaa rakennushankkeeseen ryhtyvä. Ei kukaan muu. Valmistuneesta rakennuksesta vastaa rakennuksen omistaja. Ei kukaan muu. Vastuuta ei voi delegoida eikä ulkoistaa.

## 4. Homeongelmien terveysongelmien suuruudesta sekä taloudellisesta merkityksestä

Lääketieteellisesti kaikkia rakennuksissa esiintyviä homeita tulee käsitellä toksiineina. Homeista voi syntyä kantajalleen fyysisesti pitkäaikaisia jopa elinikäisiä hengitystiesairauksia unohtamatta mahdollisia psyykkisiä ongelmia. Rakennusten kosteusvaurioiden korjauskustannukset ovat mittavia. Usein vielä ajaudutaan korjaus- ja/tai sairauskierteeseen.

Täydellistä tilastoa homeongelmien terveysongelmien suuruudesta sekä taloudellisesta merkityksestä ei ole olemassa. Kyselypohjaisten tietojen vertailtavuudessa on puutteita ja eroavuuksia. Osaa kosteusvauriosta ei ole tilastoitu millään lailla. Voidaan myös sanoa, että myöskin ylikorjataan.

### 4.1 Valtioneuvoston hometalkoot

Edellä mainituista syistä valtioneuvosto päätti politiikkariihessään 24.2.2009 käynnistää "Valtakunnalliset kosteus- ja hometalkoot". Tämän toimenpideohjelman (2009-2013) tavoitteena on kosteus- ja homeongelmien aiheuttamien terveyshaittojen ja kansantaloudellisten menetysten systemaattinen vähentäminen sekä uusien kosteusvaurioiden syntymisen torjuminen uudis- ja korjausrakentamisessa. Ympäristöministeriö koordinoi ohjelmaa.

Valtioneuvoston hometalkoiden toimenpideohjelmassa mainitaan kosteus- ja homeongelmien aiheuttamista terveyshaitoista ja kansantaloudellisista kustannuksista suuruusluokkaisesti:

- Kosteus- ja homevauriot ovat yksi tärkeimmistä syistä huonoon sisäilman laatuun, joka on yksi maamme suurimmista ympäristöterveysongelmista.
- Kosteus- ja homevauriot ovat yleisiä Suomen rakennuskannassa ja aiheuttavat varovaisen arvion mukaan *satojen miljoonien eurojen suuruiset vuotuiset terveydenhoitokustannukset* ja vähintään *samaa suuruusluokkaa olevan kiinteistöjen korjaustarpeen*.
- *Välillisten vaikutusten takia kansantaloudelliset kustannukset ovat vielä huomattavasti tätä suuremmat.*

Näihin kustannuskalkyyleihin on lisättävä ihmisten sairauskulut monine seurannaiskustannuksineen. Kaikkine välillisine ja sivukustannuksineen kansantaloudellisesti ollaan miljardisuuruusluokassa.

### 4.2 Työterveyslaitoksen tilastoa

Työterveyslaitoksen tilastotietoja / **Vaikeat sisäilmaongelmat työterveyshuollossa** (Kari Reijula, TTL. 16.1.2009):

- keskimäärin 100 uutta ammattitautia vuosittain kosteusvauriohomeista
- 55 %:ssa pientaloista on korjausta edellyttäviä kosteusvaurioita
- 45 %:ssa asuinkerrostaloista on korjausta edellyttäviä kosteusvaurioita
- kouluissa 70 %:ssa kosteusvaurioita, näkyvää hometta 50 %:ssa, 25 %:ssa homeen hajua
- sairaaloiden kosteusvauriokorjausten arvio 250 ... 265 M€.

### 4.3 Sisäilmastoseminaareissa esiteltyjä tutkimustuloksia

#### 4.3.1 Kosteusvaurio- ja homekorjaukset

Homeongelmien terveysongelmien suuruudesta sekä taloudellisesta merkityksestä on eri lähteissä selvitettyvyyso Ongelmien vuoksi lukujen suhteen suurtakin hajontaa. Eräs keskitetty taulukko on esitetty Sisäilmastoseminaarissa 1998 (Olli Seppänen). Suuruusluokkaisesti tiedot kansantalouden tasolla pitänevät yhä paikkansa. Niitä referoidaan jatkuvasti (taulukko 1):

Taulukko 1. Kosteus- ja homevaurioiden kustannuksia.

	Ylläpito	Homekorjaukset	Lämmitysenergia	Huonon sisäilman kustannukset
	M€/a	M€	M€/a	M€/a
Asuinpien talot	2,2	0,5 - 0,6	1,2	1,2 home, yms. allergia
Asuin kerrostalot	1,9	0,6 - 1,3	0,6	0,1 home, yms. allergia
Toimisto- ja hallintorakennukset	4,4	2,2	0,2	0,5 työtehon lasku
Opetusrak:t			0,1	0,5 sairauspoissaolo
Hoitoalan rak:t			0,1	oppimistulos
Kokoontumisrak:t			0,1	0,1 sairaalainfektiot
Muut rakennukset			0,3	0,7
<b>Yhteensä</b>	<b>8,5</b>	<b>3,3 - 4,1</b>	<b>2,6</b>	<b>3,1</b>

#### 4.3.2 Lääketieteelliset kustannukset

Lääketieteellisesti on tutkittu perusteellisesti asuintalojen kosteusvaurio- ja homeongelmien kustannuksia. Sisäilmastoseminaarissa 1999 (Aino Nevalainen, Tuula Putus ja muut) esiteltiin: asuintalojen kosteusvaurioiden aiheuttaman astman kustannuksia (taulukko 2).

Taulukko 2. Kosteus- ja homevaurioiden lääketieteellisiä kustannuksia.

Kustannuskomponentit	Kustannukset vuonna 1996 (M€)
Suorat terveydenhuollon kustannukset	
Lääkehoito	9,1
Avohoitopalvelut	
Lääkärissä käynnit	3,6
Hoitajalla käynnit	2,7
Poliklinikalla käynnit	4,7
Vuodeosasto hoito	2,8
<b>Yhteensä</b>	<b>22,9</b>
Potilaille aiheutuvat menot	
Kodin kunnostus	7,8
Lääkkeiden omavastuu	5,9
Muut astmasta aiheutuvat menot	2,7
<b>Yhteensä</b>	<b>16,4</b>
<b>Työstä poissa oloa (päivää)</b>	<b>42 300</b>

Asuintalojen homeiden aiheuttaman astman kustannuksia on lääkäreiden tutkimina selvitetty (taulukko 3).

*Taulukko 3. Asuintalojen homeiden aiheuttaman astman kustannukset.*

<b>Kustannuskomponentit</b>	<b>Kustannukset vuonna 1996 (M€)</b>
Suorat terveydenhuollon kustannukset	
Lääkehoito	4,8
Avohoitopalvelut	
Lääkärissä käynnit	1,9
Hoitajalla käynnit	1,5
Poliklinikalla käynnit	2,5
Vuodeosastoahoito	1,5
<b>Yhteensä</b>	<b>12,2</b>
Potilaille aiheutuvat menot	
Kodin kunnostus	4,2
Lääkkeiden omavastuu	3,2
Muut astmasta aiheutuvat menot	1,4
<b>Yhteensä</b>	<b>8,8</b>
<b>Työstä poissa oloa (päivää)</b>	<b>22 700</b>

Näin tarkkaa eriteltyä tutkimusta ei ole koko rakennuskannan laajuudelta.

Rakennuskuutioissa mitattuna asuinrakennusten osuus (Suomen tilastollinen vuosikirja) on noin 35 %. Kun arvioimme, miten saamme kokonaiskuvan asuinrakennusten kosteusvaurio- ja homevaurioista edellä referoidun tutkimuksen perusteella, karkea sairauskulukerros koko rakennuskantaan on noin kolme. Rakennusteknisiin korjauksiin menee vähintään saman verran kuin sairauskuluihin. Inflaation muutos noin 25 %. Lopputulema lienee suuruusluokkaisesti siis noin 200 M€. Kun otetaan laskelmiin yhteiskunnan ja yksilöiden menetykset rahana poissa olon kustannuksista, edelle arvioitu summa kohoaa vielä huomattavasti. Näin päädytään valtioneuvoston hometalkoiden arviomääriin.

#### **4.4 Rakentamiseen liittyviä (muuta) terveysuhkia**

Homeeseen liittyvä terveysriski on ihmisen jokapäiväisen kiinteistönpidon seurausta. Rakentamisessa ja ympäristössä on ollut ja on paljon erilaisia terveysuhkia, jotka pitää tiedostaa ja joita pitää välttää. Kuinka olemme osanneet ja osaamme ottaa huomioon erilaisia terveysuhkia rakentamisessa ja kiinteistönpidossa? Mitkä vanhoista terveysuhkista vaikuttavat yhä ja kuinka pitkään? Mitä ”uusia” terveysuhkia on tulossa?

Rakentamisen lainsäädäntömme peruskulmakiviä ovat olleet terveellisyys ja turvallisuus, joista viime mainittu sisältyy edelliseen. Olemmeko liian heppoisin perustein ottaneet käyttöön uusia materiaaleja? Olemmeko liian hitaasti luopuneet aineista, jotka ovat alkaneet osoittautua terveysuhkaksi?

Seuraavassa lyhyesti esitettynä pelkistetty kavalkadi terveysongelmallisista aineista tai materiaaleista joita on ollut tai yhä on käytössä rakentamisessa. Näihin aineisiin ei sisälly pelkästään terveysriskejä, vaan myös hengenvaarallisuutta. Luettelo ei noudata tärkeys- tai muutakaan loogista järjestystä, liekö sellaista onkaan. Varmaan luetteloa voisi laajentaakin. Kaikkia näitä materiaaleja on käytetty rakentamisessa, osaa käytetään yhä:

- DDT:tä löytyy edelleen maaperässä (esimerkiksi kasvihuoneet).
- PCB-yhdisteet ovat pysyvyydeltään ja kertyvyydeltään pahimpia ympäristömyrkkyyjä.

- Elohopea on ympäristömyrkky, jonka pitoisuudet kerääntyvät ravintoketjujen huipulle.
- Dioksiinien klooratut muodot ovat hyvin voimakkaita myrkkyyjä.
- Asbestiin liittyvä syöpätauti kehittyy hyvin hitaasti, parikin kymmentä vuotta.
- Formaldehydi ärsyttää silmiä ja ylempiä hengitysteitä.
- Radon on uraanin hajoava kaasu: kallioperä, harjut jne. Radon aiheuttaa keuhkosyöpää.
- Kreosootti ja muut kyllästysaineet.
- Monet maalit, lakat: Monien maalien ja lakkojen myrkkyyhistoriaan liittyy ammattitauteja.
- Lyijy ja kaikki sen yhdisteet ovat myrkyllisiä.
- CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>: Itse kunkin ”käyttötietoa” – vai onko?
- VOC:t
- Amebat ovat melko yleisiä kosteusvaurioituneissa taloissa. Amebat esiintyvät yhdessä kosteusvaurioita ilmentävien homesienten ja bakteerien kanssa.
- Pienhiukkaset.

Voisiko ajatella tietystä rakennuskoosta alkaen tai rakennuksen käytön perusteella, ongelmainten huoltokirjaa?

## 5. Yhteenveto

Ilman kosteutta rakennuksiimme ei voi syntyä ja muodostua hometta. Ellemme seuraa ja tarkasta rakennuksiamme säännöllisesti, kosteus- ja edelleen homevauriot tunkeutuvat taloon salakavalasti.

Säännöllisin väliajoin tehty kosteuskriittisten kohtien tarkastus on tehokasta ennalta ehkäisyä. Kun kosteus saadaan kuriin ennen vaurioita, säästytään monelta harmilta ja kustannukselta sekä laajaltakin sairauskierteeltä.

Voimme pelkistää, että lähtökohtaisesti rakennushankkeeseen ryhtyvä vastaa kaikesta rakennussuunnittelun sekä rakentamisprojektin suhteen – myös kosteus- ja homevaurioista ja niiden seurauksista, jos niitä ilmenee. Valmiin rakennuksen osalta vastuu rakennuksesta ”homeineen” on omistajalla (omistajaketjulla).

Vastuuta ei voi ostaa, myydä, ulkoistaa eikä delegoida.

Mitkä ovat tärkeimpiä tarkastuskohteita kiinteistönpidossa? Seuraavassa on tarkasteltuna potentiaalisten kosteusvaurioipaikkojen kevennettyä huoltokirjaa:

Yleistä:

- Kaikki poikkeamat normaalista rakennuksen toiminnasta on tarkistettava ja tarvittaessa ryhdyttävä korjaustoimenpiteisiin.
- Näitä huomioitavia hälytyskelloja ovat muun muassa muutokset ääni-ilmastossa, väreissä, halkeamissa jne.
- Mitään tuuletusalueita tai -reittejä ei saa rakennuksen käytön aikana tukkia:
  - yläpohjan onkalo
  - räystääs- ja päätyalueet
  - tuuletettu alapohja
  - julkisivujen tuuletusraot.

## Rakennusten sisällä:

- Ummehtunut maakellarimainen haju kertoo kosteusongelmista tai huonosta ilmanvaihdosta. Jälkimmäinen on ensin selvitettävä, ettei rynnätä hallitsemattomiin korjauksiin.
- Talvella sisäpuolelta huurteiset ikkunat kielivät huonosta ilmanvaihdosta tai lämpötilajakaumasta ikkunoiden lähellä.
- Tummunut parketti tai irtoilevat maalit, tapetit ja muovimatot voivat johtua rakenteiden liiallisesta kosteudesta tai kosteusvauriosta.
- Laipiossa esiintyvä tumma läikkä tai alue esimerkiksi lautapaneelin tai rakennuslevyn alapinnassa ilmiantaa kattorakenteen läpi tulleen vesivuodon. Vuodon alkukohta voi olla etäälläkin.
- Siivoamisen yhteydessä liiallinen ja väärä vedenkäyttö on estettävä: kuiva, nahkea, märkä.
- Veden käyttöä siivouksessa on vältettävä. Jos vettä käytetään siivouksen yhteydessä, sen poistuminen rakenteista ja materiaaleista on varmistettava.
- Pienikin kosteusmäärä, saati suuri märkyys mistä tahansa on heti poistettava. Jälkihoitona kosteuden poistumisen varmuus on todettava.
- Keittiön tiskipöydän taustan seuranta.
- Vesimittarin toimiminen, kun vettä ei oteta?

## Saunassa ja pesutiloissa:

- Lattian ja seinän alakohdissa ei saa olla rakoja tai halkeamia.
- Kevytrakenteiset seinät on aina rakennettava sisäsokkeleille ja rankarakenteiltaan hyvin jäykiksi.
- Irtoilevat muovitapetit tai halkeilleet kaakelit ovat riskitekijöitä. Tilanteen paljastuessa rakenne on purettava ja kuivattava huolellisesti ennen varsinaista korjausta.
- Putkien läpivientien on oltava hyvin tiivistettyjä.
- Ilmanvaihdon on toimittava hyvin.
- Pesutilojen ilmanvaihtoa ei saa keskeyttää ennen, kuin kosteus on kokonaan poistunut pesutiloista.

## Ulkona:

- Useat asiat toteaa helpoimmin sateella.
- Maan pinnan pitää kallistua talosta pois päin talon elinkaaren ajan.
- Seinustoilla ei saa olla pensaita eikä muuta kasvustoa.
- Vesi ei saa seisoa talon seinustoilla.
- Lattian pitää olla tuntuvasti ylempänä kuin ulkopuolinen maanpinta.
- Jos rakennuksessa on tuuletettu alapohja (rossipohja), sen pitää olla kuiva. Tuuletusaukkojen tulee olla avonaisia.
- Räystäiden ja räystäskourujen tukee olla roskattomia ja toimia hyvin sateella.
- Talvisin lämpötilan vaihdellessa 0 °C:een molemmin puolin, vesikaton toimivuutta on seurattava säännöllisesti. Mahdolliset jäätyiskohtien jää on ilman vaurioita poistettava viipymättä.
- Suuren lumimäärän yhteydessä lunta on poistettava katolta kuitenkin niin, että vesikaton pintaa ei vahingoiteta.
- Syöksytorvien on johdettava vesi alas maahan pois seinien viereltä.
- Sadevesi ei saa roiskua seinille.
- Salaojien toimivuus on tarkastettava muutaman vuoden välein. Jos on tukoksia, putkisto on avattava toimivaksi.

Home ei ”kuole” rakennustemme käyttölämpötiloissa, ei korkeissakaan. Pakkasen puolella home ”vajoaa toimimattomaan horrokseen”, mutta saatuaan lämpöä ja kosteutta se ”virkoaa” jälleen. Homevaurioitunut alue on korjauksen yhteydessä poistettava kokonaan ja tuntuvasti esiintymisalueensa joka puolelta.

Kun seuraa median uutisointia, tulee ajatelleeksi, miksi emme osaa pitää itse kunkin perheen ja koko kansakunnan tärkeimmästä omaisuusmassasta – rakennuksista – huolta?

## 6. Esimerkkejä

Homeen estäminen rakennuksissa -ohjekirjaan tuleen varsinaisesti kosteus- ja homevaurioista ja niiden korjaamisesta vain erilaisia rakentamisessamme tapahtuneita vaurioesimerkkejä. Projekteja ei kerrota tarkoin koordinaatein, eikä niihin liittyviä henkilöitä mainita.

Yhteensä esimerkkejä tulee noin 30, erittäin laajoja, laajoja ja pieniä. Vauriokavalkadin yhteiseksi nimittäjäksi voidaan nimetä kokonaisuuden ymmärtämisen puutteet. Monessakaan ei ollut ymmärretty rakennusfysiikan kaikkien eri osa-alueiden eli kaikkien olennaisten vaatimusten yhtä aikaisen toiminnan välttämättömyys.

Esimerkkien kuvauksen rakenne pyrkii olemaan seuraava:

- Tausta lyhyesti.
- Mitä alkoi ilmetä -kuvaus riittävällä tavalla.
- Ongelman ydin tarpeellisessa määrin.
- Loppuanalyysi muun muassa korjauskuvauksena.
- Kommentti silloin, kun se vielä antaa tapaukselle lisäarvoa.

## Lähdeluettelo

Seuraavassa luettelossa mainittujen lakien, asetusten ja viranomaisohjeiden (lähteet 1-5) osalta viittaus tarkoittaa aina kulloinkin voimassaolevaa säännöstöä. RIL 107 (lähde 6) vuodelta 2000 on ison työryhmän työn tulos. RIL-ohjeet (lähteet 7-9) ilmestynevät vuosina 2009-2010. Sisäilmastoseminaareja (lähde 10) on järjestetty jo 24 kertaa. Ensi keväänä järjestetään 25. Sisäilmastoseminaari.

- [1] Maankäyttö- ja rakennuslaki.
- [2] Suomen rakentamismääräyskokoelma.
- [3] Työterveyslaki.
- [4] Asumisterveysohje, STM:n opas.
- [5] Työturvallisuuslaki.
- [6] Veden ja kosteudeneristysohjeet RIL 107 2000.
- [7] Matalaenergiarakentaminen, tuleva RIL-ohje.
- [8] Homeen estäminen rakennuksissa, tuleva RIL-ohje.
- [9] Rakennusfysiikka, tuleva RIL-käsikirja.
- [10] Sisäilmastoseminaarit.





## **7. Homeen kasvun laskennallinen mallinnus**



# Rakennusmateriaalien homehtuminen laboratorio- ja kenttäkokeissa

Kati Salminen<sup>1</sup>, Hannu Viitanen<sup>2</sup>, Leena Paajanen<sup>2</sup>, Kimmo Lähdesmäki<sup>1</sup>, Tomi Strander<sup>1</sup>, Juha Vinha<sup>1</sup>, Hanna Iitti<sup>2</sup>, Tuomo Ojanen<sup>2</sup> ja Ruut Peuhkuri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus

## Tiivistelmä

Tämä esitelmä on osa artikkelisarjaa, joka perustuu Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) tekemään tutkimushankkeeseen ”Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)”.

Tutkimushanke toteutettiin vuosina 2005–2008. Hankkeessa tutkittiin homeen kasvua kahdeksassa eri rakennusmateriaalissa kenttä- ja laboratorio-olosuhteissa. Kokeet koostuivat sekä materiaali- että rakennekokeista. Homeiden kasvua koekappaleiden pinnoilla seurattiin homeindeksin arvioinnilla. Kaikissa tutkituissa materiaaleissa havaittiin homeen kasvua korkeissa kosteuskuormissa, mutta kasvu oli selvästi vähäisempää alemmissa kosteuskuormissa. Tässä artikkelissa esitetään materiaalikokeiden tuloksia.

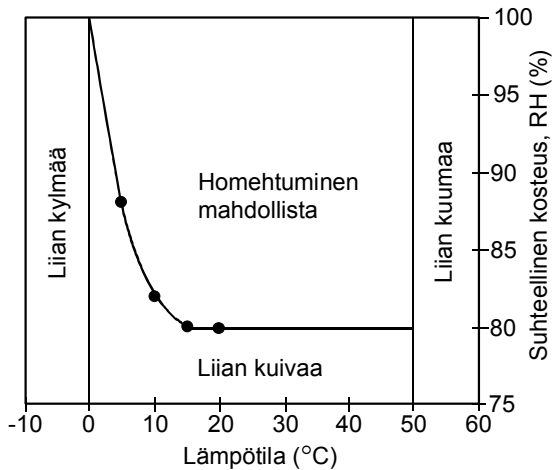
## 1. Johdanto

Homeen kasvua on havaittu erilaisissa materiaaleissa ja materiaalien homehtumista on tutkittu mm. VTT:llä usean vuoden ajan. Hannu Viitanen on kehittänyt väitöstyössään homeen kasvun matemaattisen mallin, joka kuvaa homeindeksin avulla homeen kasvun vaihetta ja intensiteettiä [1]. Tämä malli perustuu laajoihin, ensisijassa männyn pintapuulla vakioituissa ja vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaoloissa tehtyihin tutkimuksiin [2, 3]. Vuosina 2005–2008 toteutetussa Tampereen teknillisen yliopiston ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen Homemalli-tutkimusprojektissa tehtiin kokeita myös muilla rakennusmateriaaleilla. Tutkittavat materiaalit olivat betoni, kevytbetoni, kevytsorabetoni, kuusi (liimalevy), lasivilla, polyesterikuitueriste, polyuretaani (PUR) ja solupolystyreeni (EPS). Polyuretaania oli mukana sekä paperipintaista että hiottupintaista laatua. Referenssimateriaalina kokeissa käytettiin mäntyä. Kokeita tehtiin vakio-olosuhteissa laboratorioissa, mutta myös muuttuvissa olosuhteissa laboratorioissa ja kentällä. Tutkimuksen tavoitteena oli laajentaa aikaisempaa VTT:n puumateriaalille pohjautuvaa homeen kasvun mallia myös muille rakennusmateriaaleille sopivaksi sekä parantaa mallin toimintaa muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa.

## 2. Homeen kasvun määrittely

Homesienet tarvitsevat kasvaakseen sopivat olosuhteet. Lämpötilan tulee yleensä olla 0 ja 50 °C välillä ja suhteellisen kosteuden vähintään 80 % RH (alle 20 °C lämpötilassa vieläkin enemmän). Lisäksi kasvuun vaikuttavat sopivien olosuhteiden vaikutusaika sekä ravinteet [4]. Kuvassa 1 on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kannalta suotuisat alueet. Eri homesieni- ja mikrobilajeilla on erilaiset kasvuvaatimukset, mutta tässä tutkimuksessa tarkastellaan homekasvua laajana käsitteenä niin, että tarkasteluun sisältyvät erilaiset mikrobi- ja homesienilajit yleensä, eikä yksittäisiä lajeja tarkastella erikseen.

Homeen kasvu määritettiin VTT:n toimesta materiaalien pinnalta VTT:ssä kehitetyn homeindeksi-tarkastelun mukaan kaikissa tutkimukseen sisältyvissä kokeissa. Alkuperäistä indeksiä muutettiin niin, että se soveltuu eri materiaalien tarkasteluun (Taulukko 1). Homeindeksi ottaa huomioon sekä kasvun alkamisen (indeksi 1) että kasvun lisääntymisen asteen (indeksit 2 – 6). Taulukossa 1 on esitetty tässä tutkimuksessa käytetyt homeindeksien luokituskriteerit. Altistusaika materiaalikokeissa oli enimmillään noin 2 vuotta.



Kuva 1. Homeen kasvulle suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet. [2]

Taulukko 1. Homeindeksin luokitusperusteet, joita on sovellettu tässä tutkimuksessa. [5]

Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10–50 % alasta tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

### 3. Homehtumiskokeiden koejärjestelyt

#### 3.1 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeet suoritettiin kaikille koemateriaaleille. Materiaaleista valmistettiin pääsääntöisesti 50×50×20 mm kokoisia koekappaleita. Koesarja muodostui yhdeksästä koekappaleesta. Jokaiseen yhdeksän koekappaleen sarjaan otettiin materiaalia kolmesta eri tuotantoerästä, mikäli se oli mahdollista. Kokeeseen otettiin lisäksi mukaan myös männyn pintapuuta. Kaikissa kokeissa materiaalit olivat steriloimattomia, joten niissä voivat kasvaa kaikki niihin kertyneet mikrobit ja homesienet. Lisäksi laboratoriossa testattujen koekappaleiden pinnalle lisättiin neljää eri homeetta sisältävää itiösuspensiota (*Aspergillus versicolor* E1, *Penicillium* sp 1017, *Cladosporium sphaerospermum* R7 ja *Paecilomyces variotii* D-83214). Lisäys tehtiin yleensä vain toiselle pinnalle, ja tarkoituksena oli selvittää homesuspensiolisäyksen merkitys homeen kasvuunlähdölle. Suspensiossa olevat homeet kuuluvat Asumisterveysohjeessa [6] listattujen sienilajien joukkoon, ja niitä käytetään yleisesti materiaalien homehtumista

tarkastelevissa tutkimuksissa [1]. Betoni-, kevytbetoni- ja kevytsorabetonikappaleisiin suihkutettiin homesuspensiota molemmille pinnoille, koska pinnat olivat erilaisia. Muiden materiaalien koekappaleisiin vain toiselle pinnalle, jotta lisäyksen merkitystä voitiin selvittää.

Laboratoriokokeita tehtiin kahdeksassa eri olosuhteessa (taulukko 2).

*Taulukko 2. Materiaalien laboratoriokokeiden koe-olosuhteet: Tavoite-olot ja toteutuneet olosuhteet (arvioitu puun mitatun kosteuden perusteella). Syklitettyjä koesarjoja vaihdeltiin kahden olosuhteen välillä siten, että 4 – 8 viikon sykli toistui kokeiden ajan.*

Olosuhteet: Jatkuva/syklitetty	Tavoiteolosuhteet (% RH / °C)		Toteutuneet olosuhteet (% RH / °C)	
	Olosuhde 1	Olosuhde 2	Olosuhde 1	Olosuhde 2
1. Jatkuva	97 / +22		96...97 / +20...+22	
2. Sykli 4 – 8 viikkoa	97 / +22	98 / -5	95...97 / +20...+22	98...100 / -5 <sup>(1)</sup>
3. Sykli 4 – 8 viikkoa	97 / +22	98 / -20	96...97 / +20...+22	98...100 / -15...-20
4. Sykli 4 – 8 viikkoa	97 / +22	50 / +22	96...97 / +20...+22	45...55 / +20...+22 <sup>(2)</sup>
5. Jatkuva	98 / +5		97...99 / +4...+5	
6. Jatkuva	98 / -5		99...100 / -5 <sup>(1)</sup>	
7. Jatkuva	90 / +22		89...90 / +20...+22	
8. Jatkuva	90 / +5		92...95 / +4...+5	

<sup>1)</sup> Lämpötila ei ollut stabiili, se vaihteli alussa runsaasti hetkellisten sulatusjaksojen aikana, ja kosteus oli ajoittain huomattavan korkea (kondenssi).

<sup>2)</sup> Kuivakosteus ei toteutunut alussa (virhe), lopussa kuivaolosuhde toteutui.

Osa koekappaleista säilytettiin koko kokeen ajan vakio-olosuhteissa, mutta osa kokeista tehtiin niin, että koekappaleita vaihdeltiin kahden eri olosuhteen välillä. Tämä syklitys aloitettiin vasta sitten kun materiaaleissa oli jo havaittu selvää homekasvua. Halutut kosteusolosuhteet luotiin K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- ja ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O-suoloista koostuvilla kylläisillä liuoksilla.

### 3.2 Materiaalien kenttäkokeet

Materiaalien kenttäkokeita varten TTY:n koekentälle rakennettiin katos (sisämitat 3,6×5,0 m), jonne koekappaleet sijoitettiin. Katoksessa on kaksinkertainen seinärakenne, jonka välistä ulkoilma virtaa katokseen ja mahdollistaa näin ulkoilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet katoksessa. ”Tuplaseinärakenteen” tarkoituksena oli estää lumen ja viistosateen pääsy katoksen sisään. Tutkimuksen aikana lämpiminä vuodenaikoina katoksen lattialla oli kolme vesiastiaa, joiden avulla oli tarkoitus nostaa katoksen ilman suhteellista kosteutta. Katoksen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin eri korkeuksille asetetuilla kolmella Comark Dilligence EV (N2003) -merkkisellä datalogger- ja anturisysteemillä.

Kokeessa oli mukana kahden kokoisia koekappaleita. Pienet koekappaleet olivat samankokoisia (50-75×50×15-30 mm) kuin materiaalien laboratoriokokeissa. Rinnakkaisia koekappaleita oli yhdeksän. Kuusiliimapuulevystä, betonista, kevytsorabetonista ja kevytbetonista oli yhdeksän kappaleen lisäksi kolmen rinnakkaisen kappaleen sarjat, jotka pidettiin vesiupotuksessa noin seitsemän vuorokauden ajan ennen kokeen alkua. Vesiupotuksella oli tarkoitus arvioida materiaalin korkeamman alkukosteuden (kastumisen) vaikutusta homeen kasvuun. Kaikki pienet koekappaleet säilytettiin teräshyllyillä reiällisen ”muoviverkon” päällä.

Materiaalien kenttäkokeissa oli mukana myös isoja (300-600×200-600×18-75 mm) kappaleita, jotka olivat pinottuina pääsääntöisesti kuuden kappaleen kasoihin. Eristemateriaaleista (lasivilla, PUR, EPS, polyesterikuitueriste) kokeessa oli kaksi rinnakkaista kuuden kappaleen koesarjaa. Kuusiliimapuulevystä, betonista, kevytbetonista ja kevytsorabetonista toinen kuuden kappaleen

sarja oli noin yhdeksän vuorokauden ajan vesiupotuksessa ennen kokeen alkua. Höylättyä ja sahattua mäntyä ei ollut kokeessa mukana isoina kappaleina. Isot koekappaleet säilytettiin katoksen seinustoilla olevilla lavoilla pinnoitettujen vanerilevyjen päällä. Materiaalien kenttäkokeiden koekappaleita ei käsitelty homesuspensiolla ennen koetta.

## 4. Homeutumiskokeiden tulokset ja niiden tarkastelu

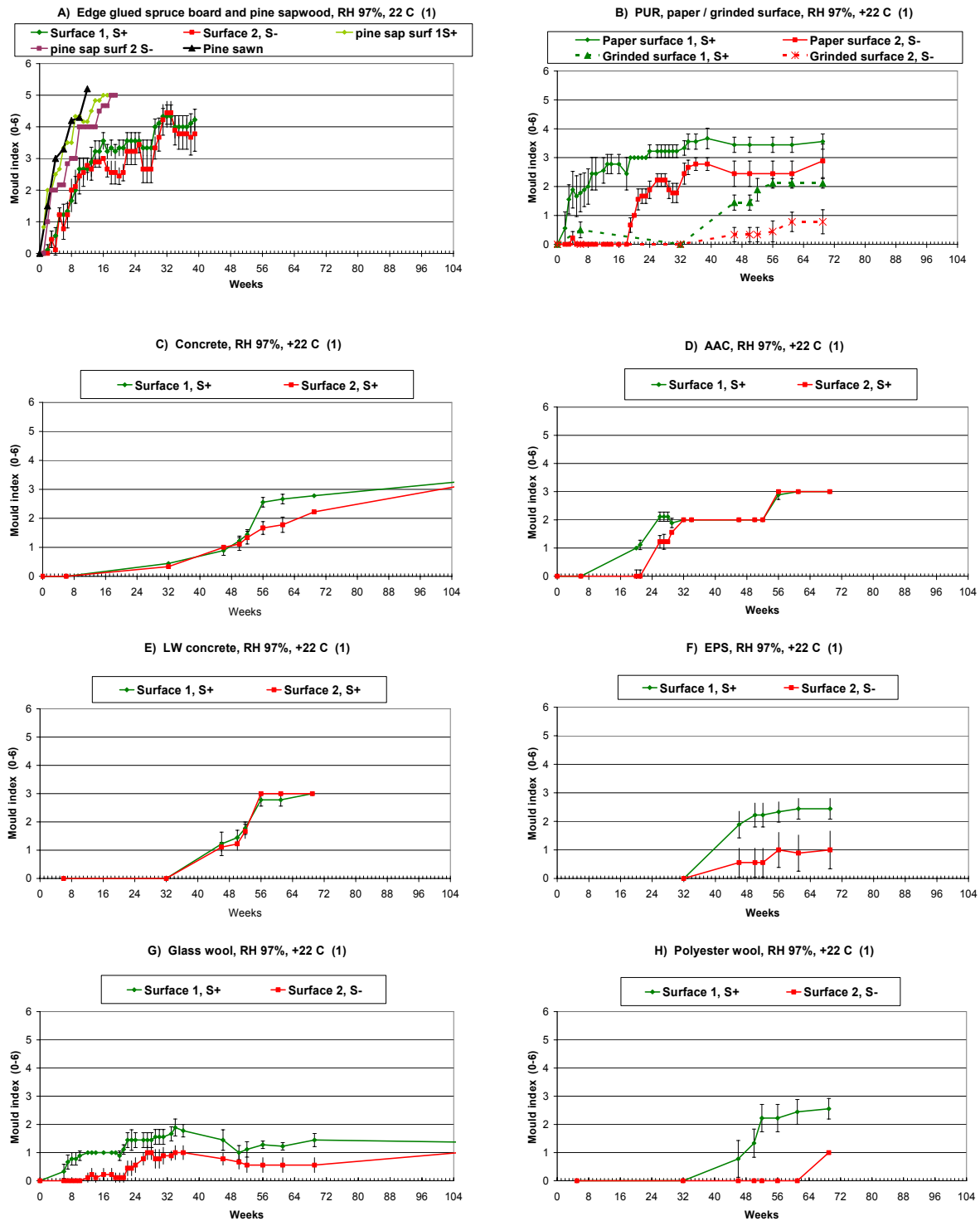
### 4.1 Laboratoriokokeet

Kaikissa materiaaleissa havaittiin homekasvua niissä vakiokoeolosuhteissa, joissa suhteellinen kosteus oli 97-98 % RH. Ensimmäiset havainnot tehtiin mänty- ja kuusikappaleissa sekä paperipintaissa polyuretaanieristeessä. Kokeessa, jossa lämpötila oli 20-22 °C ja suhteellinen kosteus 97 % RH, kasvua havaittiin heti ensimmäisen viikon jälkeen mänty- ja kuusikappaleissa (Kuva 2). Männyntapintapuussa homekasvu oli nopeampaa kuin kuusiliimapuulevyssä, jossa homekasvu oli paljaalla silmällä havaittavissa 14 viikkon altistuksen jälkeen. Homeet olivat pääasiassa *Penicillium*- ja *Aspergillus*-tyyppisiä. Suurin osa materiaaleista oli kokeessa lähes kaksi vuotta. Kuvassa 2 on esitetty materiaalien tuloskuvaajat korkeassa kosteuskuormituksessa (97% RH ja 22 °C) ja kuvassa 3 vastaavasti alemmassa kosteuskuormituksessa (RH 90 % RH ja 22 °C).

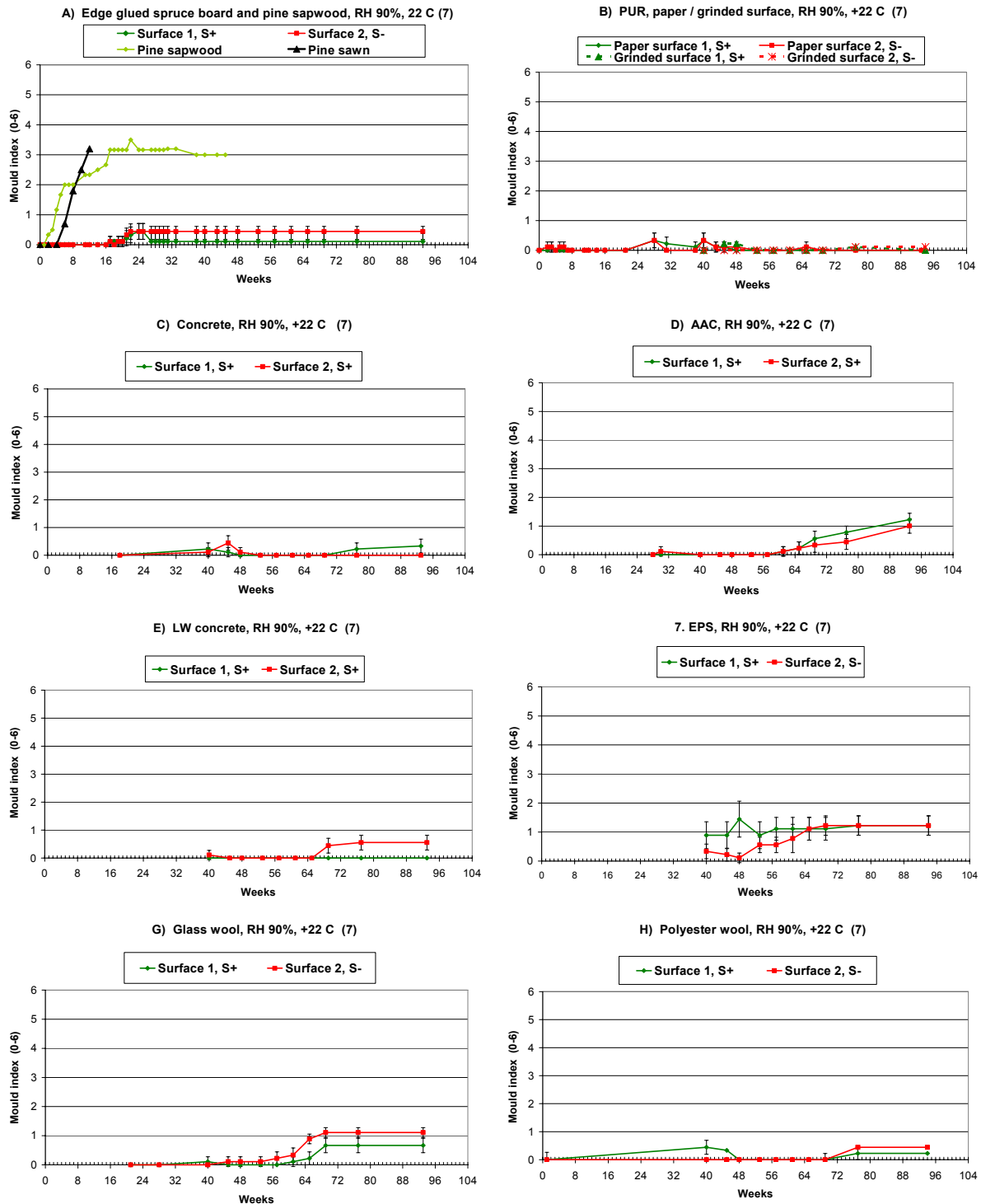
Lämpötila vaikutti korkeassa kosteuskuormituksessa jonkin verran homeen kehittymiseen. Alemmassa kosteuskuormassa (RH 90 %) homeen kasvu oli selvästi vähäisempää kuin RH 97 – 98 % kosteudessa, ja lämpötila vaikutti kasvuoloihin huomattavasti niin, että 5 °C:n lämpötiloissa kasvu oli erittäin hidasta ja sitä havaittiin lähinnä vain orgaanisilla, puuta tai selluloosaa sisältävillä materiaaleilla.

Ainoastaan männyntapintapuussa homeindeksi oli kolme tai vähän yli, kun suhteellinen kosteus oli 90 % RH ja lämpötila oli 22 °C. Kun lämpötila oli 5 °C, myös männyntapintapuussa homeindeksi jäi alle 3 ja muilla materiaaleilla homeindeksit olivat joko vähän suurempia tai pienempiä kuin 22 °C:ssa materiaalista riippuen. Lämpötilan vaikutusta homekasvun aktiivisuuteen pienensi se, että materiaalien kosteus oli alemmissa lämpötiloissa korkeampi kuin vastaavasti korkeammassa lämpötiloissa. Tämä on syytä ottaa huomioon, kun ympäristön vaikutusta biologisiin prosesseihin tarkastellaan

Useimmissa tapauksissa homeen kasvu oli nopeampaa ja runsaampaa pinnoilla, joihin oli ruiskutettu itiösuspensiota, etenkin suurissa kosteuspitoisuuksissa. Joissakin materiaaleissa kasvu näytti käynnistyvän nopeasti kohdissa, joihin oli kertynyt itiösuspensiota, mutta myöhemmin kasvu pysähtyi.



Kuva 2. A-H Homeen kasvun kehittyminen eri materiaaleilla tavoiteolosuhteissa 97 % RH ja 22 °C. Kokonaisaltistus aika materiaalista riippuen 40-124 viikkoa (betonissa ja lasivillassa 124 viikkoa). Homeindeksiluokitus on esitetty taulukossa 1 ja toteutuneet olosuhteet taulukossa 2.



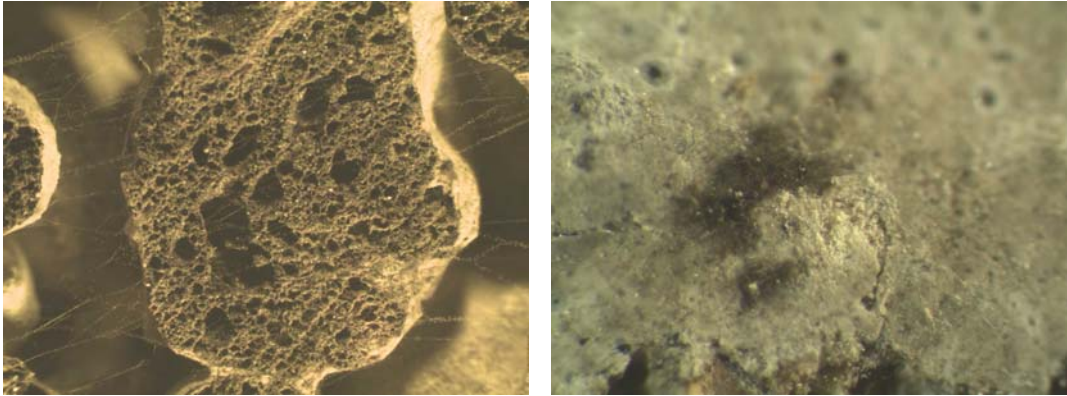
Kuva 3 A-H Homeen kasvun kehittyminen eri materiaaleilla tavoiteolosuhteissa 90 % RH ja 22 °C. Kokonaisaltistus aika 93 viikkoa. Homeindeksiluokitus on esitetty taulukossa 1 ja toteutuneet olosuhteet taulukossa 2.

Kevytbetonissa ja kevytsorabetonissa havaittiin korkeammissa kosteuksissa runsaasti hyvin ohutta, vain mikroskoopilla näkyvää homesienirihmastoja (kuva 4, vasen). Paljain silmin se oli näkymätöntä, vaikka vihertäviä itiöitä oli paljon. Home oli pääasiassa ohutrimasta (*Paecilomyces*), mutta myös *Aspergillus*- ja *Penicillium*-homeet olivat yleisiä. Ohutta rihmastoja havaittiin myös betonikappaleissa, varsinkin niissä olevien ”avohuokosten” kohdalla.



Juuri tällaisen runsaan paljain silmin näkymättömän rihmaston vuoksi homeindeksi nostettiin suurempaan luokkaan.

Betonin pinnalla havaittiin tummaa *Cladosporium*-hometta paikoin homeindeksin 3 verran (kuva 4, oikea) sekä muutamalla muottipinnalla hyvin vähän tummaa paksurihmastoista hometta. Myös muutamissa kevytbetoni- ja kevytsorabetonikappaleissa kasvoi tummaa homerihmastoja.



Kuva 4. Vasemmalla: Ohutta *Paecilomyces*- tyyppistä hometta kevytsorabetonin sahatulla pinnalla. Samanlaista hometta kasvoi myös kevytbetonin pinnalla. Oikealla: tummaa homekasvustoa betonin pinnalla.

Homeen havainnoinnin kannalta vaaleissa materiaaleissa pienetkin tumman homesienirihmaston muodostamat kasvustot olivat helposti paljain silmin nähtävissä, jolloin homeindeksi saavutti tason 3. Kivimateriaaleissa havaittiin kokeiden myöhemmässä vaiheessa runsaasti mikroskooppista kasvua, jolloin niissäkin homeindeksi saavutti tason 3, paikoin jopa 4.

Monilla materiaaleilla kasvu keskittyi kohtiin, joihin oli kertynyt homesuspensiota, mikä viittaa siihen, että kasvu tapahtui lähinnä suspension vaikutuksesta. Kasvu käynnistyi aluksi nopeasti, mutta kehittyminen pysähtyi myöhemmin.

Viljelykokeella haluttiin selvittää, minkä tyyppisiä mikrobeja materiaalista voitiin eristää kokeiden lopussa (Taulukko 4 ja 5). Tulosten mukaan kaikista materiaaleista saatiin viljelykokeissa kasvamaan samoja mikrobi- ja homesienisukuja, mutta esim. kosteuden vaikutusta ei viljelykokeilla saatu luotettavasti esiin, vaikka suuntaa-antavaa eroa voitiin havaita. Merkittävin ero oli vain se, että aktinomykeetti-bakteereja saatiin enemmän esiin silloin, kun kosteus oli korkea (RH 97 – 98 %). Tämä vahvistaa käsitystä siitä, että viljelykoetta ei voida käyttää kasvun seurantaan tämän kaltaisissa kokeissa, sillä ne voivat antaa virheellisen kuvan kasvun intensiteetistä. Viljelykokeessa tuloksena on kaikki materiaalien pintaan kertyneet partikkelit, eikä niillä ole suoraa riippuvuutta materiaalien pinnalla todella kasvaviin mikrobeihin.

Kivipohjaisissa materiaaleissa saatiin kasvamaan samoja lajeja kuin puupohjaisissa materiaaleissa, mutta kasvualustan ero, lähinnä ravinnepitoisuus, ilmeisesti vaikutti homesienten kasvatapaan ja kasvun voimakkuuteen. Mahdollinen kasvu koemateriaaleissa voitiin todeta luotettavammin mikroskooppianalyysillä. Kokeessa ei ollut mukana hometta vastaan erikseen suojattuja materiaaleja, joihin on lisätty fungisideja.

Taulukko 4. Materiaaleissa viljelykokeiden avulla havaitut homesienet ja bakteerit, materiaalien säilytysolosuhteet laboratoriossa olivat 97 % RH ja 22 °C. Havaitut valtalajit on mainittu ensin.

Materiaali	Homesienet	Bakteerit
Puu- ja paperipohjaiset materiaalit	<i>Penicillium, Aspergillus</i> , kasvu runsas	Aktinobakteerit kasvu runsas
Lämmöneristeet	<i>Aspergillus, Penicillium, Cladosporium</i> , kasvu runsas	Aktinobakteerit kasvu runsas
Kivipohjaiset materiaalit	<i>Aspergillus, Penicillium, Cladosporium (Stachybotrus)</i> , kasvu runsas	Aktinobakteerit kasvu runsas

Taulukko 5. Materiaaleissa viljelykokeiden avulla havaitut homesienet ja bakteerit, materiaalien säilytysolosuhteet laboratoriossa olivat 90 % RH ja 22 °C. Havaitut valtalajit on mainittu ensin.

Materiaali	Homesienet	Bakteerit
Puu- ja paperipohjaiset materiaalit	<i>Penicillium, Aspergillus</i> kasvu runsas	ei havaittu tai ei kasvua Aktinobakteerit kasvua vähän
Lämmöneristeet	<i>Aspergillus, Penicillium (Mucor)</i> kasvu runsas tai melkoinen	ei havaittu tai ei kasvua Aktinobakteerit kasvua vähän
Kivipohjaiset materiaalit	<i>Aspergillus, Penicillium</i> kasvua melkoisesti	ei havaittu tai ei kasvua Aktinobakteerit kasvua vähän

Huomautus taulukoihin 4 ja 5: Viljelyssä ei saada kaikkia materiaaleissa kasvaneita homesieniä ja bakteereja kasvamaan ja toisaalta esiin voi tulla myös sellaisia homeita, jotka eivät kasvaaneet rakennusmateriaaleissa

Vaihtelevissa koeolosuhteissa pakkasen vaikutus homeiden kasvuun oli vaihtelevaa, toisissa materiaaleissa kasvu heikkeni ja toisissa taas sillä ei ollut vaikutusta tai se jopa lisäsi homeindeksiä. Tämä voi johtua siitä, että joissakin tapauksissa kylmät jaksot voivat lisätä itiöiden muodostusta, jolloin homeindeksi nousee tästä syystä. Kaiken kaikkiaan eri materiaaleissa ei havaittu kovin merkittävää eroa homeen kasvun suhteen, kun olosuhteet vaihtelivat.

Kuivan ajan vaikutusta tutkittaessa altistuksen alkuvaiheessa kuivat jaksot eivät toteutuneet koejärjestelyissä olleen virheen vuoksi, mutta myöhemmissä vaiheissa voitiin havaita, että kuivajaksoilla oli indeksiä heikentävä vaikutus. Tämä tukee käsitystä siitä, että etenkin pitkä kuiva jakso heikentää homeiden kasvua. Useimpien materiaalien osalta ne heikensivät kasvua, mutta joissakin tapauksissa kuivalla jaksolla ei ollut selvää vaikutusta homeindeksiin etenkin, jos kasvu oli jo edennyt pitkälle. Joissakin materiaaleissa kasvu näytti käynnistyvän nopeasti kohdissa, joihin oli kertynyt itiösuspensiota, mutta myöhemmin kasvu pysähtyi lähes täysin jo ennen kuivajakson vaikutusta homeen kasvuun.

## 4.2 Kenttäkokeet

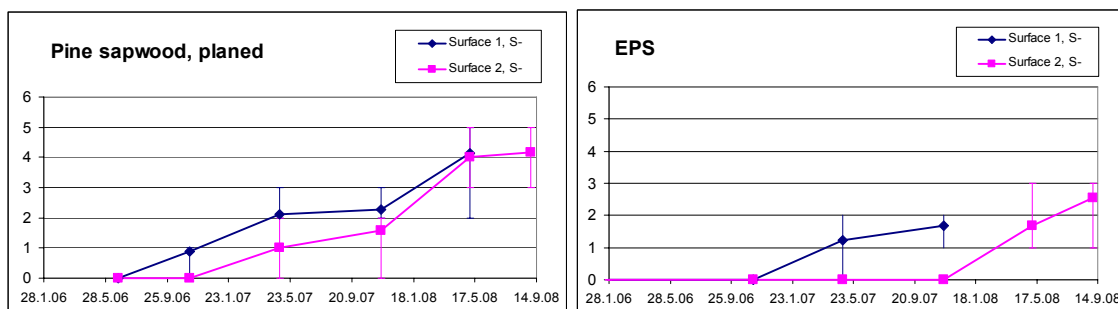
Kenttäkokeissa olleiden koekappaleiden yläpinnoille alkoi nopeasti kertyä siitepölyä ja muuta orgaanista likaa. Ensimmäinen tarkastus tehtiin noin neljän kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta, jolloin homeindeksi oli 0-1 vain pienten puukappaleiden pinnalla.

Kaikkien materiaalien homeenkasvu tarkastettiin noin 9,5 kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta. Silloin nollasta poikkeavat homeindeksit havaittiin kuusiliimapuulevyn lisäksi kevytsorabetonilla (M=1), kevytbetonilla (M=2), betonilla (M=1) ja höylätyllä männällä (M=1). Ensimmäisissä tarkastuksissa alkavaa homekasvua havaittiin pinnan likakerroksessa. Mikäli materiaalin pinta oli epätasainen ja siinä oli erilaisia avoimia huokosia, mikroskooppisia

”kuoppia tai onkaloita”, likaa kertyi erityisesti tällaisiin materiaaleihin. Homekasvua havaittiin kaikissa materiaaleissa enemmän yläpinnoilla kuin alapinnoilla. Tutkimuksen loppupuolella kaikkien materiaalien yläpinnoilla oli niin paljon likaa, että viimeisessä tarkastuksessa yhdenkään materiaalin yläpintoja ei enää tarkastettu.

Kun kokeen alkamisesta oli 16 kuukautta, kaikkien materiaalien yläpinnoilla havaittiin mikroskoopilla tarkasteltuna homekasvua. Sarjojen keskiarvoina laskettuina korkeimmat homeindeksit olivat tuolloin PUR:n paperipinnalla ( $M = 2,2$ ) ja höyläpintaisella männyllä ( $M = 2,1$ ). Osassa näissä materiaaleissa havaittiin myös paljaalla silmällä näkyvää kasvua (indeksi 3). Kevytbetonissa ja vesiupotuksessa olleessa kuusiliimapuulevyssä homekasvua löytyi myös alapinnoilta. Pienimmät keskiarvoina lasketut homeindeksit olivat polyesterikuitueristeellä ( $M = 0,3$ ) ja hiottupintaisella PUR:lla ( $M = 0,3$ ). Tuloksista nähtiin silloin myös, että vesiupotuksessa olleet kuusiliimapuulevyt olivat siihen mennessä homehtuneet hieman kuivia enemmän. Kivimateriaaleilla vesiupotuksen ei havaittu juurikaan vaikuttavan homeen kasvuun.

Kokeen lopussa suurin havaittu homeindeksi oli useissa höyläpintaisissa mäntykoekappaleissa sekä ala-, että yläpinnassa ( $M=5$ ). Sahapintaisten männyn yläpinnan homeindeksi oli 5 ja alapinnan homeindeksi tasolla 4. Kuusiliimapuulevyn lopullinen homeindeksin taso alapinnalla oli 2-3 ja yläpinnalla 2. Paperipintaisten PUR:n, lasivillan ja betonin yläpinnoilla sekä paperipintaisten PUR:n, EPS:n ja betonin alapinnoilla havaittiin homeindeksitasoa  $M=2-3$ . EPS:n, kevytsorabetonin ja kevytbetonin yläpinnoilla, lasivillan alapinnalla sekä polyesterikuitueristeen molemmilla pinnoilla kokeen lopussa homeindeksin taso oli noin 2. Kevytbetonin ja kevytsorabetonin alapintojen homeindeksitasot olivat kokeen päättyessä tasolla 0-1.



Kuva 5. Vasemmalla: höyläpintaisten männyn homeindeksin kehittyminen kokeen aikana. Oikealla: EPS:n homeindeksin kehittyminen kokeen aikana.

Pinottuja, isoja koekappaleita tutkittiin kokeen aikana silmämääräisesti ja luupin avulla. Näissä ”varastokasoissa” homekasvua havaittiin 16 kuukauden kuluttua kappaleiden välisissä pinnoissa vesiupotuksessa olleessa kuusiliimapuulevyssä. Kokeen loputtua homekasvua pystyttiin silmämääräisesti havaitsemaan ainoastaan kokeen alussa vesiupotuksessa olleissa kuusiliimapuulevyissä. Niissä homeindeksi oli 3. Luupin avulla tarkastetuissa isoissa paperipintaisten PUR-kappaleiden paperipinnoissa havaittiin muutamissa homeindeksitasoa 1. Muissa isoissa koekappaleissa ei silmämääräisesti eikä luupin avulla tarkastettuna havaittu homeenkasvua. Isoja koekappaleita ei tarkastettu mikroskoopilla lainkaan.

## 5. Yhteenveto

Homemalli-projektin materiaalien laboratorio- ja kenttäkokeet suoritettiin vuosina 2006–2008. Kokeissa, joissa suhteellinen kosteus on 97 % RH, homekasvua havaittiin kaikissa materiaaleissa. Lämpötilan ollessa 22 °C, puumateriaalien homekasvu oli runsainta. Korkeassa

kosteudessa lämpötilalla ei ollut suurta merkitystä homeen kasvun kannalta ja myös alhaisemmassa 5 °C:n lämpötilassa kaikissa koemateriaaleissa havaittiin homekasvua. Alemmassa kosteudessa (RH 90 %) homeindeksin kehittyminen oli huomattavasti hitaampaa ja vähäisempää, eikä homekasvua edes havaittu kaikissa materiaaleissa. Kun lämpötila oli 5 °C, myös männyn homeindeksi jäi alle 3 ja muilla materiaaleilla homeindeksit olivat hyvin pienet. Syklitetyissä olosuhteissa kylmä- ja kuivajaksot vaikuttivat materiaalien homekasvuun vaihtelevasti. Pakkasen vaikutus homeiden kasvuun oli vaihtelevaa, toisissa materiaaleissa kasvu heikkeni ja toisissa taas sillä ei ollut vaikutusta tai se jopa suurensi homeindeksiä. Kuivajaksot heikensivät useimpien materiaalien homekasvua, mutta etenkin tapauksissa, joissa kasvu oli jo edennyt pitkälle tai kuiva jakso oli lyhyt, kuivalla jaksolla ei ollut selvää vaikutusta homeindeksiin.

Materiaalien kenttäkokeet tehtiin katoksessa, jossa lämpötila ja suhteellinen kosteus olivat samat kuin ulkoilmassa, mutta koekappaleet olivat suojassa sateelta. Näissä olosuhteissa kaikissa materiaaleissa havaittiin homekasvua. Kokeen lopussa suurin homeindeksi oli höyläpintaisissa mäntykappaleissa (M=5). Muiden materiaalien yläpintojen homeindeksit vaihtelivat välillä 2–4. Koekappaleiden pinnoille kertyi runsaasti orgaanista likaa ja homekasvua havaittiinkin kaikilla materiaaleilla enemmän ylä- kuin alapinnoilla. Osa koekappaleista pidettiin vesiupotuksessa ennen koetta. Näissä kappaleissa ei kuusta lukuun ottamatta havaittu enempää homekasvua kuin kuivissa koekappaleissa. Katoksessa testattiin myös, kuinka koemateriaalit säilyvät varastokasoihin pinottuina. Pinoutuissa koekappaleissa havaittiin homekasvua vesiupotuksessa olleessa kuusiliimapuulevyssä (M=3) ja paperipintaisen PUR:n paperissa (M=1).

## Kiitokset

Tekes, VTT ja useat rakennusalan yritykset rahoittivat 4-vuotisen tutkimushankkeen "Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)". Kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille henkilöille.

## Lähdeluettelo

- [1] Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. Doctoral Thesis. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. 58 p
- [2] Hukka, A. and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33(6)475-485
- [3] Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report no 221. 40 p + app 9 p.
- [4] Viitanen, H. & Bjurman, J. 1995. Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. Mat. und Org. 29(1): 27-46.
- [5] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iitti, H. 2009. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaistaan vuonna 2009.
- [6] Sosiaali- ja terveysministeriö 2003. Asumisterveysopas. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Helsinki: Edita Prima Oy.

## Homeen kasvu seinärakenteissa laboratorio- ja kenttäkokeissa

Kimmo Lähdesmäki<sup>1</sup>, Kati Salminen<sup>1</sup>, Juha Vinha<sup>1</sup>, Tomi Strander<sup>1</sup>, Hannu Viitanen<sup>2</sup>,  
Leena Paajanen<sup>2</sup>, Hanna Iitti<sup>2</sup>, Tuomo Ojanen<sup>2</sup> ja Ruut Peuhkuri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus

### Tiivistelmä

Tämä esitelmä on osa artikkelisarjaa, joka perustuu Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) tekemään tutkimushankkeeseen ”Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)”. Tutkimushanke toteutettiin vuosina 2005–2008. Tutkimuksen tavoitteena oli laajentaa aiemmin VTT:llä puumateriaaleille kehitettyä homeen kasvun laskennallista mallia myös muille rakennusmateriaaleille sopivaksi sekä parantaa mallin toimintaa muuttuvissa olosuhteissa.

Tässä paperissa tarkastellaan homeen kasvua seinärakenteissa kahdeksassa eri rakennusmateriaalissa. Rakennekokeet käsittivät sekä laboratoriossa että kentällä tehtyjä kokeita. Rakennekokeissa tutkittiin kahden toisissaan kiinni olevan materiaalin rajapinnan homehtumista. Tutkittavat materiaaliyhdistelmät muodostuivat ns. runkomateriaalista (betoni, kevytbetoni, kevytsorabetoni ja kuusiliimapuulevy) ja runkomateriaalin kanssa kontaktissa olevasta lämmöneristeestä (lasivilla, polyesterikuitueriste, paperipintainen polyuretaani (PUR paperi) ja solupolystyreeni (EPS)). Laboratoriossa tutkittiin yhteensä 16 ja kentällä yhteensä 4 erilaista rakenneyhdistelmää. Kentällä tutkittavat rakenteet asennettiin koalueella olevan koemökin seinään ja materiaalien rajapintojen olosuhteet riippuivat koemökin sisäolosuhteiden lisäksi ulkona vallinneista ulko-olosuhteista.

Laboratoriokokeissa rakenteet altistettiin ensin homeen kasvun kannalta otolliseen olosuhteeseen ja tämän jälkeen homeen kasvun kannalta epäedullisimpiin olosuhteisiin. Havaittiin, että materiaalien homeindeksitasot kehittyivät eri materiaaleissa ja rakenteissa eri nopeudella ja että materiaalien maksimihomeindeksitasoissa on eroavaisuutta. Kylmä jakso (ns. taantumaolosuhde) vaikuttaa eri materiaalien homeen kasvuun eri tavalla. Joillakin materiaaleilla homeindeksien tasot laskivat kylmän jakson aikana. Kokonaisuudessaan rakennekokeissa materiaalien homeindeksit jäivät melko alhaiselle tasolle. Suurimpana syynä voidaan pitää koetilanteessa olleita olosuhteita sekä sitä, että materiaalien homehtuminen on erilaista materiaalin ollessa vapaasti ns. ilmakosketuksessa tai suojassa rakenteen sisällä.

### 1. Johdanto

Alkuperäinen VTT:llä kehitetty homeen kasvun matemaattinen malli pohjautuu kattaviin, ensisijassa pinnoittamattomilla puumateriaaleilla tehtyihin materiaalikokeiden tuloksiin [1-3]. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää olemassa olevaa homeen kasvun laskentamallia ja sen luotettavuutta etenkin muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Lisäksi tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli saada tietoa kahden materiaalin välisen rajapinnan homehtumisesta. Rakennekokeissa tehtyjä kahden materiaalin rajapinnan homehtumistuloksia käytettiin kehitettäessä homeen kasvun laskennallista mallia eri materiaaleille vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa sekä homeen kasvun taantuman mallintamisen kehittämiseen eri materiaaleille.

## 2. Homeen kasvun määrittely

Homeen kasvun määrittelyä on käsitelty tämän julkaisun edellisessä artikkelissa ”Rakennusmateriaalien homehtuminen laboratorio- ja kenttäkokeissa”. Homekasvun arviointi perustuu homeindeksi-määrittelyyn, jossa homeen kasvun alkaminen ja määrä arvioidaan indekseillä 0-6 sen mukaan, kuinka suuri osa pinnasta on homekasvuston peitossa ja havaitaanko homeet mikroskoopilla vai paljaalla silmällä (Taulukko 1).

Taulukko 1. Homekasvun arviointi indeksien avulla.

Home- indeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10–50 % alasta tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

## 3. Rakenteiden homehtumiskokeiden koejärjestelyt

### 3.1 Rakenteiden laboratoriokokeet

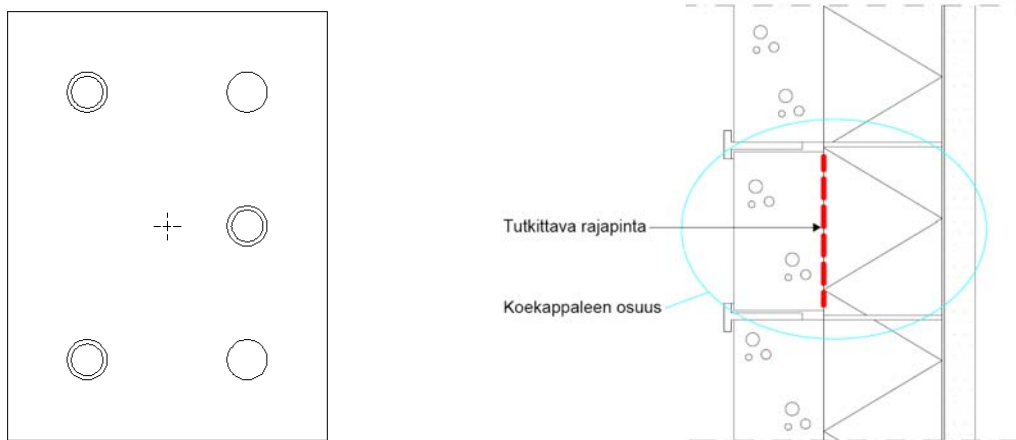
Rakenteiden laboratoriokokeet tehtiin tutkimuksessa mukana olevilla materiaaleilla siten, että jokainen eriste (lasivilla, PUR paperi, EPS ja polyesterikuitueriste) muodostivat rakenneyhdistelmän muiden tutkittavien ns. runkomateriaalien kanssa (kuusiliimapuulevy, betoni, kevytbetoni ja kevytsorabetoni).

Rakenteiden laboratoriokokeet tehtiin kahdessa eri koe-erässä. Molemmissa koe-erissä oli kahdeksan erilaista rakenneyhdistelmää eli yhteensä tutkittavia rakenneyhdistelmiä oli 16 kappaletta. Yhden rakenteen koko oli  $600 \times 800 \text{ mm}^2$ . Ensimmäinen koe-erä muodostui rakenneyhdistelmistä: kevytbetoni–lasivilla, kevytbetoni–polyesterikuitueriste, kuusiliimapuulevy–lasivilla, kuusiliimapuulevy–polyesterikuitueriste, kevytsorabetoni–lasivilla, kevytsorabetoni–polyesterikuitueriste, betoni-lasivilla ja betoni-polyesterikuitueriste. Toisen koe-erän rakenneyhdistelmät olivat kevytbetoni–PUR paperi, kevytbetoni–EPS, kuusiliimapuulevy–PUR paperi, kuusiliimapuulevy–EPS, kevytsorabetoni–PUR paperi, kevytsorabetoni–EPS, betoni–PUR paperi ja betoni–EPS. Rakenneyhdistelmien tutkittavien materiaalien rajapinnat ruiskutettiin ennen rakenteiden koeolosuhteisiin asentamista samoista homeista valmistetulla suspensiolla kuin materiaalien laboratoriokokeissa [4].

Rakenteet tutkittiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen laboratoriossa olevassa kosteushuoneessa sekä ulkoseinä-rakenteiden säärasisuuskokeistossa. Jokainen tutkittava rakenne suunniteltiin kosteus- ja lämpötekniisesti siten, että kunkin rakenneyhdistelmän tutkittavassa rajapinnassa olosuhteet olisivat olleet keskenään suunnilleen samalla tasolla. Jotta homehtuminen tutkittavassa rajapinnassa olisi ollut mahdollista, rajapinnan suhteellinen kosteus pyrittiin saamaan tavoitellun korkeaksi. Tästä syystä rakenteet tehtiin tarkoituksen mukaisesti vääränlaisiksi. Mm. jokaisen tutkittavan rakenteen ulkopintaan kahdesta tutkittavista materiaaleista valittiin suuremman vesihöyrynvastuksen omaava materiaali, jotta rajapinnan

suhteellinen kosteus saatiin nousemaan riittävän korkeaksi. Koska tutkittavien materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet (mm. vesihöyrynvastukset ja lämmönjohtavuudet) poikkesivat toisistaan, useissa rakenteissa käytettiin kokeen aikana lisälämmöneristystä ja/tai ilman-/höyrynsulkukalvoja, jotta tutkittavien rajapintojen lämpötila- ja kosteusolosuhteet olisivat olleet mahdollisimman lähellä tavoiteltuja olosuhteita. Rakenteiden laboratoriossa tutkittujen rakenteiden kuvat ja materiaalikerrokset on esitetty tarkemmin lähteessä [4].

Materiaalien rajapintojen homeen kehittymisen arvioimiseksi jokaiseen rakenteeseen tehtiin tarkastuskohdat (lieriöt). Ulompi tutkittava materiaali oli päistään avonaisen tulpan sisällä, jonka avulla tutkittava koelieriö voitiin irrottaa rakenteesta ja asentaa/ tiivistää rakenteeseen uudelleen. (kuva 1, oikea). Materiaalien homehtumista seurattiin mikroskoopilla sekä silmämääräisesti säännöllisin väliajoin. Rakenteiden laboratoriokokeissa jokaisessa rakenteessa (koe-elementissä) oli kolme tarkastuskohtaa (lieriötä) (kuva 1, vasen).



Kuva 1. Vasemmalla: Periaatekuva yhdestä koe-elementistä. Yhdessä elementissä oli kolme lieriötä materiaalien homehtumistarkasteluja varten. Kuvassa kaksi sisäkkäistä ympyrää kuvaa koelieriöiden paikkoja, ympyrät RH:n tarkistuspaikkoja ja rakenteen keskellä oleva risti kuvaa RH/T-anturin paikkaa. Oikealla: Periaatekuva yhdestä koekappaleesta (koelieriöstä), joka irrotettiin rakenteesta homeen kasvun tarkastuksen ajaksi.

Rakenteiden laboratoriokokeet tehtiin kolmessa eri koejaksossa. Taulukossa 1 on esitetty rakenteiden laboratoriokokeiden tavoiteolosuhteet.

Taulukko 1. Tavoiteolosuhteet rakenteiden laboratoriokokeissa.

Olosuhteet:	Tavoiteolosuhteet rakenteiden rajapinnoissa	
	[% RH]	[°C]
1. Koejakso, ns. syysjakso	vakio: 95...97	vakio: +20...+22
2. Koejakso, ns. talvijakso	vakio: 95...100	vakio: -6...-4
3. Koejakso ns. kevätjakso	ei tavoitetta RH:lle	1 vrk:n sykli: -5...+15

Ensimmäisessä jaksossa (ns. syysjakso) rakenteet säilytettiin kosteushuoneessa lämpimässä ja kosteassa vakio-olosuhteessa. Toinen koejakso (ns. talvijakso) oli kostea ja kylmä jakso ja kolmannella koejaksolla (ns. kevätjakso) oli vaihtelevat lämpötilaolosuhteet. Toinen ja kolmas koejakso suoritettiin seinärakenteiden sääräslaitteistolla. Kolmannella jaksolla lämpötilan syklisen vaihtelun johdosta rakenteiden rajapintojen suhteellisia kosteuksia ei pystytty hallitsemaan, vaan suhteelliset kosteudet vaihtelivat rakennekohtaisesti hyvinkin paljon.

Kaikkien jaksojen aikana jokaisen rakenteen rajapinnan olosuhde (lämpötila ja suhteellinen kosteus) mitattiin jatkuvatoimisella mittauksella.

### 3.2 Rakenteiden kenttäkokeet

Rakenteiden kenttäkokeet suoritettiin TTY:n koealueella olevassa koemökissä. Tutkittavat rakenteet asennettiin koemökin etelä- ja pohjoissivun tutkimusaukkoihin. Molemmissa ilmansuunnissa olevissa tutkimusaukoissa oli samat rakenteet, joista tutkittiin kahden materiaalien rajapintojen homehtumista vastaavalla tavalla kuin rakenteiden laboratorioskokeissa. Molemmat seinät koostuvat neljästä erilaisesta rakenteesta. Rakenteiden kenttäkokeissa jokainen lämmöneriste muodosti rakenneyhdistelmän kuusiliimapuulevyn kanssa. Rakenteiden kenttäkokeissa ei ollut mukana betonia, kevytbetonia tai kevytsorabetonia. Tutkittavat rakenneyhdistelmät olivat kuusiliimapuulevy-lasivilla, kuusiliimapuulevy-PUR paperi, kuusiliimapuulevy-EPS ja kuusiliimapuulevy-polyesterikuitueriste. Kaikissa rakenteissa kuusiliimapuulevy oli rakenteen ulkopinnassa ja tutkittava lämmöneriste kuusiliimapuulevyn sisäpuolella. Rajapintojen homehtumista tarkastettiin vastaavalla tavalla kuin rakenteiden laboratorioskokeissa irrottamalla molemmat tutkittavat materiaalien koelieriöt rakenteista. Joka rakenteessa kahden kuusiliimapuulevyn koelieriön tilalle asennettiin ennen koetta myös höylätyn männyn koelieriö, jolloin voitiin tutkia myös rakenneyhdistelmät mänty-lasivilla, mänty-PUR paperi, mänty-EPS ja mänty-polyesterikuitueriste. Rakenneyhdistelmistä koostuvan yhden koko seinän tutkimusaukon koko oli  $1200 \times 2400 \text{ mm}^2$  ja siten yhden rakenteen koko oli  $600 \times 1200 \text{ mm}^2$ .

Rakenteiden kenttäkokeissa koerakennuksen sisälle säädettiin sisäilman olosuhteet. Sisäilman lämpötilaksi säädettiin  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ja sisäilman kosteuspitoisuus säädettiin ulkoilman kosteuspitoisuuden mukaan. Koemökin sisäilmaan säädettiin kosteuslisä, jonka johdosta sisäilman kosteus siirtyi diffuusion avulla rakenteiden ulko-osia kohti. Sisäilman kosteuslisää vaihdeltiin tutkimuksen aikana  $2\text{-}7 \text{ g/m}^3$ :n välillä mm. vuodenaikojen mukaan. Ulko-olosuhteet määräytyvät ulkoilman mukaan. Tutkittavat rakenteet suojattiin molemmissa ilmansuunnissa vanerilla, jotta viistosade ei päässyt kastelemaan tutkittavia rakenteita. Tutkittavien rajapintojen homehtuminen ja kosteusolosuhteiden säätäminen ja määrittäminen oli hallitumpaa, kun rakenteisiin ei päässyt viistosaderasitusta.

## 4. Rakenteiden homehtumiskokeiden tulokset ja niiden tarkastelu

### 4.1 Rakenteiden laboratorioskokeet

#### 4.1.1 Koejaksojen toteutuneet olosuhteet ja kestot

Ensimmäisellä koejaksolla (ns. syksyjakso) rakenteiden rajapintojen lämpötilat vaihtelivat eri rakenteista riippuen keskimäärin noin  $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$ :n välillä ja suhteellisen kosteuden osalla koejakson alkuosaa lukuun ottamatta noin  $92\text{-}97 \text{ } \%$  RH:n välillä. Ensimmäinen koejakso kesti molemmilla koe-erillä noin 7 kuukautta. Toisella koejaksolla (ns. talvijakso) rakenteiden rajapintojen lämpötilat olivat rakenteesta riippuen keskimäärin  $-8\text{...}-2 \text{ }^\circ\text{C}$  ja suhteelliset kosteudet  $88\text{-}100 \text{ } \%$  RH. Toinen koejakso kesti ensimmäisellä koe-erällä noin 4 kuukautta ja toisella koe-erällä noin 6 kuukautta. Kolmannella koejaksolla (syklinen ns. kevätjakso) rakenteiden rajapintojen lämpötilat muuttuivat vuorokauden sykleissä  $1\text{-}2 \text{ h}$ :n aika-askeleella muutamasta pakkasasteesta noin  $10\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$ :seen. Suhteellinen kosteus kolmannella jaksolla rajapinnoissa oli rakenteista riippuen  $45\text{-}100 \text{ } \%$  RH:n välillä. Kolmas koejakso kesti ensimmäisellä koe-erällä noin



5,5 kuukautta ja toisella koe-erällä noin 6 kuukautta. Alkuperäisestä tutkimussuunnitelmasta poiketen tutkimuksen aikana päätettiin koe-erä 1 koestaa vielä neljännellä jaksolla, mikä oli olosuhteiltaan vastaavanlainen ensimmäisen koejakson kanssa. Koe-erä 1 oli neljännellä koejaksolla vielä uudelleen yhtäjaksoisesti noin 11 kuukautta. Koe-erää 2 ei koestettu neljännellä koejaksolla.

Jokaisessa rakenteessa olosuhteet olivat keskenään erilaiset molempien koe-erien osalta johtuen materiaaliyhdistelmien erilaisista rakennusfysikaalisista ominaisuuksista. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että koe-erien kesken mm. koejaksojen pituuksissa oli eroja. Olosuhde-eroista ja erilaisista koeaikojen pituuksista johtuen koe-erien homeindeksituloksia ei tule verrata keskenään. Kaikkien koerakenteiden toteutuneet olosuhteet on esitetty lähteessä [4]. Eri koe-erien olosuhteiden vaihtelut johtuivat materiaalien erilaisten rakennusfysikaalisten ominaisuuksien lisäksi mm. koelaitteistojen teknisistä säätöominaisuuksista ja koejaksojen pituuserot mm. laitteistojen muusta tutkimuskäytöstä.

#### 4.1.2 Homeindeksien kehittyminen

Ensimmäisen koe-erän ensimmäisellä jaksolla noin kolmen kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta oli havaittavissa mikroskoopilla ensimmäiset nollasta poikkeavat homeindeksin arvot. Kuusiliimapuulevy-lasivilla-yhdistelmässä kuusiliimapuulevyn pinnalla yksittäisissä koekappaleissa havaittiin homeindeksi  $M=1$  (samassa rakenteessa kiinni olevassa lasivillassa  $M=0$ ) ja kuusiliimapuulevy-polyesterikuitueriste-yhdistelmässä yhdessä kuusiliimapuulevyn koekappaleessa homeindeksi  $M=3$  (samassa rakenteessa kiinni olevassa polyesterikuitueristeessä  $M=0$ ). Ensimmäisen tarkastuksen, kolmen kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta, yksittäisten kappaleiden tuloksia ei ole merkitty tässä esitettyihin kuviin. Kuuden kuukauden kuluttua kokeen alkamisen jälkeen kuusiliimapuulevyn pinnalla homeindeksit vaihtelivat jonkin verran rakenneyhdistelmistä riippuen välillä  $M=1-3$ . Muissa materiaaleissa homeindeksit vaihtelivat jokaisen rakenteen osalla välillä  $M=0-1$ .

Kostean ja lämpimän jakson (1. jakso) lopussa kuusiliimapuulevyn pinnalla havaittiin korkeimmat homeindeksin arvot ja ne olivat tasolla  $M=2-3$ . Muissa materiaaleissa rakenneyhdistelmästä riippuen homeindeksit olivat tasolla  $M=0-2$ .

Kostean ja kylmän jakson aikana (2. jakso) yhdessäkään materiaalissa ei havaittu homeindeksin nousemista. Muutamien materiaalien yksittäisissä näytteissä oli havaittavissa homeindeksin laskua yhden lukeman verran, kun homeindeksi oli laskenut arvosta  $M=1$  arvoon  $M=0$  tai arvosta  $M=2$  arvoon  $M=1$ .

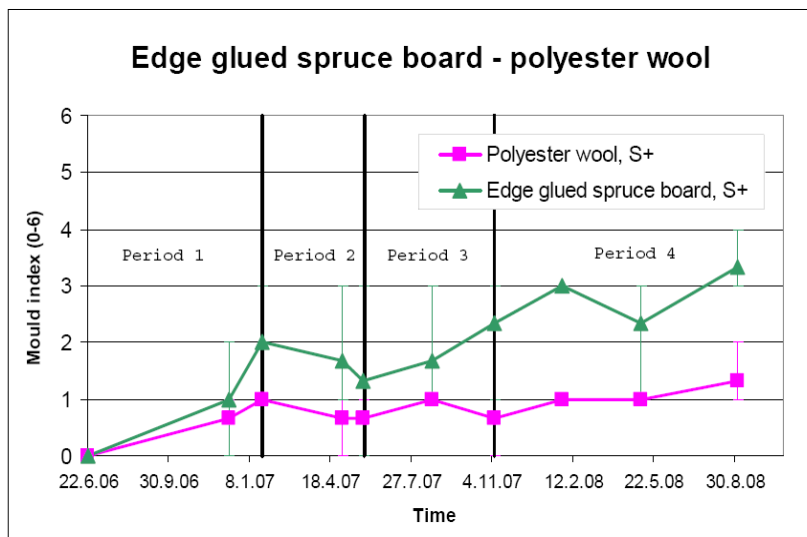
Kolmannen koejakson (ns. kevätjakso) alkupuolella homeindeksit olivat materiaalien pinnoilla lähes poikkeuksetta samalla tasolla kuin toisen jakson jälkeen. Kevätjakson lopussa kuusiliimapuulevyn homeindeksien keskiarvot olivat jonkin verran nousseet molemmissa rakenteissa (kuusi liimapuulevy-lasivilla ja kuusi liimapuulevy-polyesterikuitueriste), mutta samojen rakenteiden lämmöneristeissä homeindeksitaso nousua ei tapahtunut. Lähes pääsääntöisesti materiaaleissa rakenteista riippumatta homeindeksitasot pysyivät koko kevätjakson samalla tasolla. Kevätjakson jälkeen kuusi liimapuulevyä lukuun ottamatta kaikkien materiaalien homeindeksit olivat keskimäärin tasolla  $M=0-1$ . Kuusiliimapuulevyn homeindeksitaso molemmissa rakenteissa oli kevätjakson jälkeen noin  $M=2-3$ .

Neljännellä koejaksolla (uudelleen sama kostea ja lämmin jakso kuin koejakso 1) homeindeksit alkoivat nousta joissakin materiaaleissa melko nopeasti. Neljännen jakson jälkeen homeindeksit

olivat melkein jokaisessa materiaalissa korkeampia kuin kolmannen jakson päätyttyä. Neljännen jakson jälkeen homeindeksit olivat pääsääntöisesti myös korkeammalla tasolla kuin ensimmäisen jakson jälkeen. Ensimmäisen ja neljännen jakson olosuhteet olivat suunnilleen samanlaisia, mutta neljäs jakso kesti selvästi ensimmäistä jaksoa kauemmin.

Neljännen jakson jälkeen kuusiliimapuulevyllä homeindeksit olivat tasolla M=3-4, kevytbetonilla ja betonilla M=2-3 ja muilla materiaaleilla tasolla M=1-3. Kevytbetonissa (kevytbetoni-polyesterikuitueriste-rakenteessa) ja betonissa (betoni-lasivilla-rakenteessa) näytteissä ei havaittu homeenkasvua silmämääräisesti, mutta niiden näytteissä oli erityisen voimakasta homeen hajua ja mikroskoopilla havaittavaa näytteen pinta-alaan nähden laajaa homeenkasvua. Samojen rakenteiden lämmöneristeissä sekä homeen haju, että homeen kasvu oli selvästi vähäisempää.

Kuvassa 2 on esitetty kuusiliimapuulevy-polyesterikuitueriste-rakenteen rajapinnan homeindeksin kehittyminen. Ennen rakenteiden laboratoriokokeiden aloitusta rakenteissa käytettyjen tutkittavien materiaalien pinnoille suihkutettiin vastaava suspensio, jota materiaalikokeissa käytettiin [4]. Tulostuvaajissa suspension käyttö on merkitty S+:lla.



Kuva 2. Ensimmäisen koe-erän yksi rakenne: Kuusiliimapuulevy-polyesterikuitu-rakenteen homeindeksien kehittyminen tutkimuksen aikana koejaksoilla 1-4.

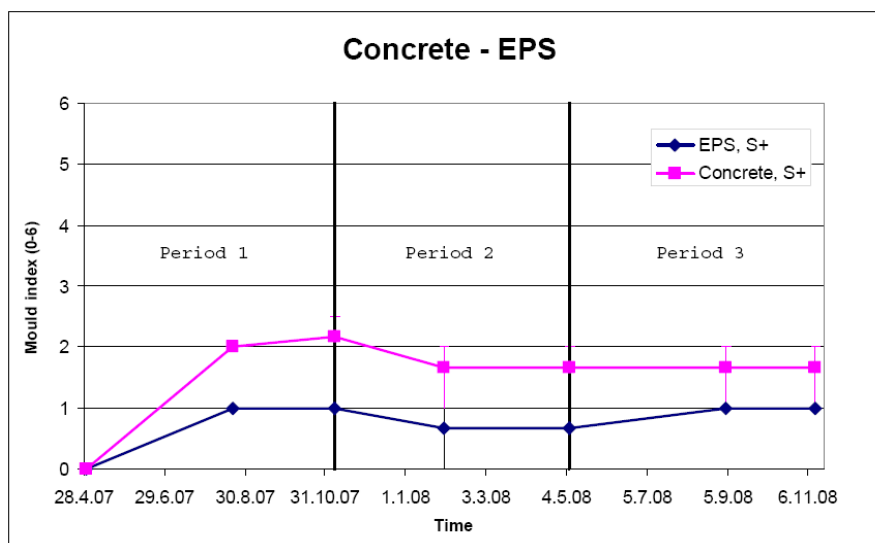
Toisen koe-erän ensimmäisen jakson (kosteaa ja lämmin koejakso) lopussa betonin pinnalla havaittiin korkeimmat homeindeksin arvot sekä EPS-betoni, että PUR paperi-betoni-rakenteissa (M=2-3). Kuusiliimapuulevy, kevytbetoni, EPS ja PUR paperi olivat ensimmäisen jakson jälkeen homeindeksitasolla M=1-2 ja kevytsorabetoni tasolla M=1.

Toisen jakson (kosteaa ja kylmä koejakso) aikana yhdenkään materiaalin homeindeksitaso ei noussut, vaan homeindeksit joko laskivat hyvin vähän tai pysyivät lähes samalla tasolla. Toisen jakson lopussa betonin, kuusi liimapuulevyn, EPS:n ja kevytbetonin homeindeksitasot olivat M=1-2, kevytsorabetonin ja PUR paperin tasolla M=0-1.

Kolmannen koejakson (vaihteleva lämpötila) alkupuolella homeindeksit olivat materiaalien pinnoilla lähes poikkeuksetta samalla tasolla kuin toisen jakson jälkeen. Kevytbetonin homeindeksi nousi (PUR paperi-kevytbetoni-rakenteessa) jonkin verran (M=2:sta M=3:een), EPS:n ja kuusi liimapuulevyn homeindeksit nousivat hyvin vähän verrattuna toisen jakson lopun tilanteeseen. Betonin homeindeksitaso laski vähän kolmannen jakson alkupuolella.

Kevätjakson (3. jakso) loppuun mennessä homeindeksien keskiarvot olivat keskimäärin jonkin verran nousseet tai pysyneet suunnilleen samoina kun vertailutasona oli toisen jakson loppu. Selvemmin kolmannen jakson aikana nousua oli tapahtunut kevytbetonissa (kevytbetoni - PUR paperi-rakenteessa), jossa homeindeksin keskiarvo oli noussut hieman alle M=2:sta hieman yli M=3:een. Toisessa kevytbetonirakenteessa (PUR paperi-kevytbetoni-rakenteessa) sitä vastoin kolmannen jakson lopussa homeindeksi oli jopa vähän alhaisempi kuin toisen jakson lopussa. Kuusiliimapuulevyssä homeindeksin keskiarvo oli noussut noin M=1,5:stä M=2,5:een. Muissa materiaaleissa nousutaso oli vähäisempää tai sitä ei tapahtunut lainkaan.

Kuvassa 3 näkyy betoni-EPS-rakenneyhdistelmän rajapinnan homeindeksin kehittyminen kokeen aikana.



Kuva 3. Betoni-EPS-rakenteen homeindeksien kehittyminen tutkimuksen aikana.

Tuloksia tarkasteltaessa ja eri rakenteita tai materiaaleja vertailtaessa keskenään tulee ottaa huomioon, että eri rakenteissa lämpötila- ja kosteusolosuhteet poikkesivat toisistaan. **Tästä syystä eri materiaaleissa ja rakenteissa havaittuja homeindeksien arvoja ei tule verrata keskenään.**

#### 4.2 Rakenteiden kenttäkokeiden tulokset

Rakenteiden kenttäkokeet kestivät 12/2006–9/2008 välisen ajan. Olosuhteet eri rakenteiden sisässä erosivat huomattavasti toisistaan kokeen aikana. Niissä seinärakenteissa, joissa eristeenä olivat paperipintainen PUR ja EPS, suhteelliset kosteudet olivat koko tutkimuksen ajan keskimäärin 15–20 % RH alhaisempia kuin lasivilla- ja polyesterikuitueristeissä seinissä. Tämä johtui siitä, että kaikki rakenteet asennettiin tähän kenttäkoetutkimukseen siten, että kuusiliimapuulevy oli rakenteen ulkopintana ja lämmöneriste liimapuulevyn sisäpuolella. Koska polyuretaani- ja EPS-eristeillä on suurempi vesihöyrynvastus kuin puulla, sisältäpäin diffuusiolla tullut kosteus ei nostanut tutkittavien materiaalien rajapintojen suhteellista kosteutta niin ylös kuin lasivilla- ja polyesterikuitu-eristeisillä seinillä. Erityisen merkittäväksi suhteellisen kosteuden erot tulevat, kun suhteellinen kosteus nousee 80 % RH:n yläpuolelle, koska homeenkasvu tätä alhaisemmassa kosteudessa on hyvin epätodennäköistä. Polyuretaani- ja EPS-eristeisissä seinissä rajapintojen suhteelliset kosteudet eivät nousseet koko tutkimuksen aikana yli 80 % RH. **Materiaalien altistuminen eri rakenteissa oli erilaista ja siten materiaalien homeindeksi-arvoja ei voida verrata keskenään.**

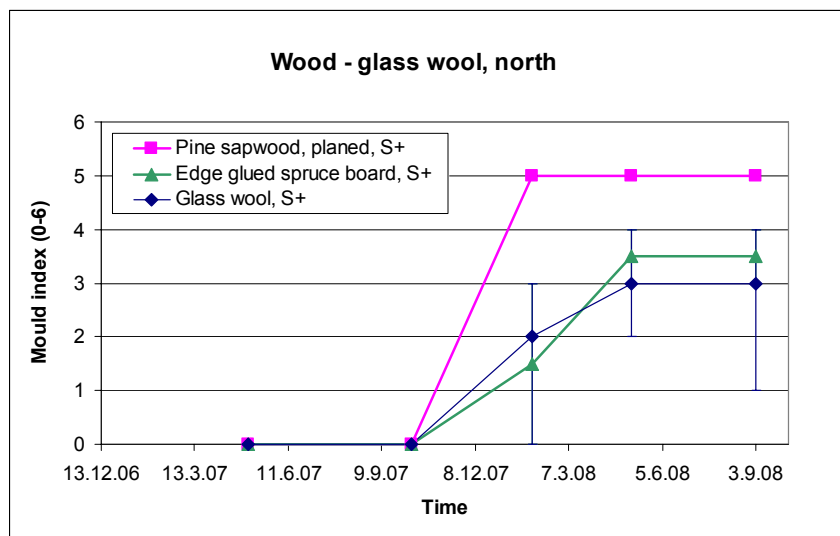
Ensimmäiset rakenteiden kenttäkokeiden homeindeksitarkastelut mikroskoopilla tehtiin viiden kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta osalle materiaaleista. Kyseisellä ajanjaksolla tarkasteltavissa rajapinnoissa lämpötila oli ollut jokaisessa rakenteessa keskimäärin  $-5 \dots +5$ :n välillä. PUR paperi- ja EPS-eristeissä seinissä rajapintojen suhteelliset kosteudet olivat olleet siihen mennessä keskimäärin 60-70 % RH ja lasivilla ja polyesterikuitu-eristeissä seinissä noin 80-90 % RH. Ensimmäisessä mikroskooppitarkastelussa jokaisen koelieriön pinnalta homeindeksin arvoksi saatiin  $M=0$  jokaisessa tarkastetussa rakenteessa.

Rakenteiden kenttäkokeista ensimmäiset nolosta poikkeavat homeindeksien arvot saatiin noin 11 kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta, kun polyesterikuitueristeen pinnalla havaittiin homeindeksi  $M=1$  ja kuusiliimalevyssä homeindeksi  $M=2$  (puu-lasivilla-rakenteessa).

Talven 2007 - 2008 aikana erityisesti männyn koekappaleissa havaittiin erittäin voimakasta homeenkasvua. Homeindeksit nousivat hyvin nopeasti tarkastusten välillä tasolta  $M=0-1$  tasolle  $M=5$  erityisesti pohjoissivun seinissä. Myös etelän puolen seinissä sekä männyn että kuusiliimapuulevyn pinnoissa homeindeksit nousivat hyvin korkealle. Lasivillassa ja polyesterikuitueristeessä homeindeksit nousivat samaan aikaan tasolle  $M=2-4$ . Talven 2007-2008 aikana rakenteiden kenttäkokeiden koemökin sisäilman kosteuslisää nostettiin tarkoituksella, koska siihen mennessä rakenteiden homehtuminen oli ollut ennakoitua hitaampaa ja siten lähtötietoja homeen kasvun laskennallisen mallin kehittämiseksi ei oltu tältä osin vielä saatu. Koemökin sisäilman kosteussisällön nostamisen takia rajapintojen kosteudet nousivat selvästi ja kun samaan aikaan ulkoilman lämpötilan laskusta johtuen myös rajapinnan lämpötila laski, havaittiin tarkastusten yhteydessä näytteiden pinnoissa tiivistynyttä irtokosteutta. Irtokosteus on tässä tapauksessa todennäköisesti kiihdyttänyt homeenkasvua.

Puu-lasivilla- ja puu-polyesterikuitueriste-rakenteissa homeindeksit pysyivät korkealla tutkimuksen loppuun asti, vaikka tutkimuksen loppupuolella olosuhteet homeenkasvun kannalta heikkenivät. Yhdessäkään korkean homeindeksitason ( $M=3-5$ ) saavuttaneessa näytteessä homeindeksi ei laskenut tutkimuksen loppupuolella. Kuvassa 4 on esitetty puu-lasivilla-rakenteen homeindeksikuvaaja.

PUR paperi- ja EPS-eristeissä rakenteissa ei havaittu homeindeksien nousemista, lukuun ottamatta yksittäisiä puunäytteitä, joissa mikroskoopilla tarkasteltuna havaittiin homeindeksin olevan ajoittain tasolla 1.



Kuva 4. Puu-lasivilla-rakenteen homeindeksin kehittyminen rakenteiden kenttäkokeissa pohjoissivun seinällä.

## 5. Yhteenveto

Rakenteiden laboratorio- ja kenttäkokeilla saatiin tietoa kahden toisissaan kosketuksissa olevan eri materiaalin rajapinnan homehtumisherkkyydestä. Homeenkasvua tarkasteltiin rakenteista irrotettavista koelieriöistä homeindeksin ( $M=0-6$ ) perusteella. Laboratoriossa suoritettujen rakennekokeiden simuloivat erilaisia kosteuskuormia. Sekä eri koe-erien välillä, että saman koe-erän rakenteissa tarkasteltavien rajapintojen olosuhteissa oli keskenään eroja. Tästä syystä rakenteita, eikä materiaaleja tule verrata homehtumisen kannalta keskenään, vaan saadut tulokset ovat ensisijaisesti mallinnuksen kehittämiseen käytettäviä lähtötietoja.

Rakenteiden laboratoriokokeissa homeen kasvun selvin kehittyminen jokaisessa materiaalissa tapahtui ensimmäisellä koejaksoilla, ns. syysjaksolla, jolloin lämpötila- ja kosteusolosuhteet olivat homeenkasvun kannalta otollisimmat. Kostea ja lämmin koejakso seuranneen toisen jakson (ns. talvijakso) ja kolmannen jakson (ns. kevätjakso) aikana oli tarkoitus saada selville homeen kasvun kannalta epäedullisen olosuhteen vaikutus materiaalin homeen kasvamiseen.

Materiaalien homeindeksitasot kehittyivät eri materiaaleissa ja rakenteissa eri nopeudella ja maksimihomeindeksitasot olivat materiaalikoekiden tavoin eri materiaaleilla eri tasolla. Rakenteiden laboratoriokokeiden ensimmäisen koejakson jälkeen korkeimmat homeindeksien arvot olivat tasolla  $M=3$  (kuusiliimapuulevy ja betoni). Muiden materiaalien homeindeksit olivat välillä  $M=1-2$ . Toisella jaksolla minkään materiaalin homekasvu ei lisääntynyt. Joillakin materiaaleilla, kuten kevytbetonilla, betonilla ja kuusiliimapuulevyllä homeindeksi laski talvijakson aikana keskimäärin muita materiaaleja jonkin verran enemmän. Kevätjaksolla (lämpötilan syklitys vuorokauden jaksoissa) kaikkien materiaalien homeindeksit pysyivät lähes ennallaan (lievää laskua voitiin havaita). 1. koe-erän rakenteet koestettiin vielä uudelleen neljännellä jaksolla, joka oli sama kuin 1. jakso, mutta kestoltaan selvästi pidempi. Tämän aikana homeindeksit kehittyivät jälleen nopeammin korkean kosteuden vaikutuksesta.

Rakenteiden kenttäkokeissa tutkittiin rakenneyhdistelminä jokainen lämmöneriste puumateriaaliin (kuusiliimapuulevy ja höylätty mänty) yhdistettynä. Kokeet suoritettiin kentällä olevassa koemökissä. Tutkittavat rakenteet suojattiin viistosateelta ja koemökin sisälle säädettiin kosteuslisä, jonka johdosta sisäpuolelta kosteus siirtyi rakenteeseen diffuusiolla. Tavoitteena oli

saada tutkittaviin rakenteiden rajapintoihin homeenkasvulle otolliset olosuhteet.

Rakennusratkaisuista ja materiaalien ominaisuuksista johtuen pehmeiden eristeiden (lasivilla ja polyesterikuitueriste) rakenteissa suhteelliset kosteudet olivat koko tutkimuksen ajan huomattavasti korkeammat kuin kovien lämmöneristeiden (EPS ja PUR paperi) rakenteissa.

Rakenteiden kenttäkokeissa höylätty mänty nousi tutkimuksen aikana homeindeksitasolle  $M=5$ , kuusiliimapuulevy korkeimmillaan tasolle  $M=4-5$ , lasivilla ja polyesterikuitueriste tasolle  $M=2-4$ . Em. rakenteissa havaittiin tutkimuksen aikana selvästi irtokosteutta, joka omalta osaltaan vaikutti nopeaan ja tasoltaan korkeaan homeenkasvuun. Rakenteiden kenttäkokeissa havaittiin kuitenkin se (eroavaisuutena rakenteiden laboratoriokokeisiin), että homeindeksit eivät laskeneet, vaikka tutkimuksen loppupuolella rakenteiden kosteus- ja lämpötilaolosuhteet olivat homeen kasvun kannalta epäedulliset. Voidaankin olettaa, että ns. taantumaolosuhteilla ei ole niin paljoa merkitystä, kun homeenkasvu on jo päässyt rakenteissa korkealle tasolle. Rakenteiden kenttäkokeissa kovissa lämmöneristeissä ja niiden kanssa rakenneyhdistelmän muodostaneissa puumateriaaleissa ei käytännössä havaittu homeenkasvua johtuen ko. rakenteiden hyvin alhaisista kosteusolosuhteista. Kenttäkokeissa ilmansuunnalla (pohjoinen vs. etelä) ei tässä tutkimuksessa ollut materiaalien homeen kasvun kannalta merkitystä.

Tässä esitetyissä rakennekokeiden tuloksissa voidaan havaita, että samassa rakenteessa kahden toisissaan kiinni olevan eri materiaalien maksimihomeindeksitasot ovat keskenään useissa tapauksessa erilaiset. Myös saman rakenteen kahden eri materiaalin homeenkasvun nopeudessa on eroavaisuutta. Myös saman materiaalin homeen kasvun käyttäytyminen on erilaista, kun materiaali on rakenteen sisällä tai kun materiaali on vapaasti ”ilmakosketuksessa”. Näitä asioita on käsitelty enemmän tässä julkaisussa olevassa artikkelissa ”Homeen kasvun mallintaminen vaihtelevissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa” sekä viitteessä [4].

## Kiitokset

Tekes, VTT ja useat rakennusalan yritykset rahoittivat 4-vuotisen tutkimushankkeen ”Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)”. Kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille henkilöille.

## Lähdeluettelo

- [1] Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. Doctoral Thesis. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. 58 ps
- [2] Hukka, A. and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33(6) 475-485.
- [3] Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report no 221. 40 p + app 9 p.
- [4] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iitti, H. 2009. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaistaan vuonna 2009.

## Rakennusmateriaalien homeenkestävyys ja sen mallintaminen pysyvissä kosteusrasitusoloissa

Ruut Peuhkuri<sup>1</sup>, Hannu Viitanen<sup>1</sup>, Tuomo Ojanen<sup>1</sup>, Juha Vinha<sup>2</sup> ja Kimmo Lähdesmäki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus

<sup>2</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

### Tiivistelmä

Tämä esitelmä käsittelee homeen kasvun tarkastelua ja mallintamista erilaisissa rakennusmateriaaleissa ja on osa artikkelisarjaa, joka perustuu TTY:n ja VTT:n vastapäättyneeseen 4-vuotiseen tutkimushankkeeseen "Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)".

Laskentamallia kehitettiin saatujen koetulosten sekä aikaisemmin saadun tiedon perusteella siten, että mallin homehtumisnopeutta ja –prosessia kuvaava osuus perustui materiaalien laboratoriokeiden vakio-olosuhteiden koetuloksiin. Tulosten mukaan materiaalit reagoivat homealtistukseen eri tavoin ja materiaalien homeen kestävyuden mallintamisessa otettiin huomioon toisaalta niille ominainen homehtumisnopeus ja toisaalta maksimaalinen odotettavissa oleva homehtumistaso. Mallitarkastelun pohjalta rakennusmateriaalit voidaan homeen kestävyuden suhteen luokitella suuntaa-antavasti homeen kasvulle hyvin herkkiin ja homeen kasvulle vastustuskykyisiin sekä ääripäiden väliin sijoittuviin luokkiin. Koska pinnoitteet ja erityisesti epäpuhtaudet vaikuttavat paljonkin itse materiaalien ominaisuuksiin homeen kasvun kannalta, on aina arvioitava mallinnuksen tulokset suhteessa mallinnettuun tapaukseen ja sen reunaehtoihin.

### 1. Johdanto

Rakennusten rakenteiden toimivuuden ja terveellisen sisäilman takaamiseksi on tärkeää selvittää, millaisissa oloissa hometta voi kehittyä eri materiaaleihin ja miten homeen kasvua pystytään ennakoimaan laskennallisin keinoin jo suunnitteluvaiheessa. Homehtumisriskin laskennallinen malli kuvaa homeen kasvua matemaattisesti. Se on tarkoitettu osaksi rakennusfysikaalista tarkastelua, jolloin sitä voidaan käyttää laajemmin rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden varmentamisen apuna.

Tässä hankkeessa kehitetty homeen kasvun laskennallinen malli (lyhyesti ”homemalli”) pohjautuu VTT:ssä aiemmin lähinnä käsittelemättömille puumateriaaleille kehitettyyn homeen kasvun matemaattiseen malliin. Homemalli ottaa huomioon homeen kehitysasteen ja pitkäaikaisten luonnonolosuhteiden vaikutukset homeen kasvun muutoksille. Hankkeen tarkoituksena oli tarkentaa olemassa olevaa homemallia: kattaa useampia materiaaleja ja ottaa huomioon mm. pakkasen ja kuivuuden vaikutukset.

Seuraavassa käydään lyhyesti läpi mallin kehitystä varten tehdyt tarkastelut ja analyysit erikseen itämis- ja kasvuprosessin suhteen sekä maksimaalista homeindeksiä varten. Kehitetyn laskentamallin perusteella lasketut mallikäyrät muutamille eri vakio-olosuhteille esitetään ja niitä verrataan projektissa havainnoituihin homeindekseihin eri materiaaleille.

## 2. Malli homeen itämiselle ja kasvulle männyn pintapuussa

Homesienet tarvitsevat itääkseen ja kasvaakseen sopivat olosuhteet. Lämpötilan ja kosteuden tulee olla riittävän korkeat. Lisäksi kasvuun vaikuttavat sopivien olosuhteiden vaikutusaika sekä ravinteet. VTT Rakennustekniikassa homeen kasvun alkamista on jo monien vuosien ajan tutkittu pääasiassa pienillä koekappaleilla laboratoriossa tehtyjen homehtumiskokeiden perusteella [1; 2]. Alkuperäinen homemalli perustuu näihin laajoihin, ensisijassa männyn pintapuulla vakioituissa ja vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaoloissa tehtyihin tutkimuksiin. Homekasvun arviointi perustuu homeindeksimäärittelyyn, jossa homeen kasvun alkaminen ja määrä arvioidaan indekseillä 0-6 sen mukaan, kuinka suuri osa pinnasta on homekasvuston peitossa ja havaitaanko homeet mikroskoopilla vai paljaalla silmällä (Taulukko 1). Homeindeksin määrittely on tarkemmin esitetty tämän seminaarin aikaisemmassa esityksessä [3].

Taulukko 1. Homekasvun arviointi indeksien avulla.

Home-indeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10–50 % alasta tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homeindeksi painottuu homeen kasvun alkuvaiheeseen ja on kasvun mittarina luonteeltaan logaritminen. Tulokset on sitten muotoiltu homeen kasvun alkamiseen tarvittavaa aikaa kuvaavaksi regressiomalliksi, joka soveltuu homehtumisriskin arviointiin vakio-olosuhteissa.

Muuttuvissa olosuhteissa malli koski alunperin vain kahden eri olosuhteen vuorottelua, jolloin kysymyksessä ovat vuoroin homeen kasvulle suosiolliset ja vuoroin epäsuotuisat kosteusolot vakiolämpötilassa. Tulosten ja regressiomallien pohjalta on sittemmin laadittu matemaattinen malli, jolla homeen kasvun riskiä voidaan ennustaa erilaisissa muuttuvissa kosteus- ja lämpöoloissa [4, 5]. Myös muiden rakennusmateriaalien kuin puun homehtumisherkkyyttä on tutkittu ennenkin, esimerkiksi kipsilevyn, vanerin, kuitulevyn, betonin, betonitasoitteen, mutta varsinaista laskentamallia näille ei ole kehitetty.

### 2.1 Alkuperäinen homemalli vakio-olosuhteissa

Homeen kasvun alkamiselle suosiolliset kosteusolot riippuvat vallitsevasta lämpötilasta. Mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta home alkaisi kasvaa. Jos kosteus on tämän kriittisen rajan alapuolella, on homeen kannalta kysymyksessä ns. kuiva aika, joka selvästi hidastaa tai pysäyttää kasvun. Kyseistä rajakäyrää kuvataan yhtälöllä (1)

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, & \text{kun } T \leq 20 \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20 \end{cases} \quad (1)$$

jossa T on lämpötila [°C] ja  $RH_{min} = 80$  [%].



Vakio-oloissa pienillä männyn ja kuusen pintapuun koekappaleilla on saatu homeen kasvun alkamisen (homehtumisindeksi 1) kriittistä aikaa kuvaava regressiomalli (2):

$$t_m = \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02). \quad (2)$$

missä  $t_m$  = homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika [vko]  
 $T$  = lämpötila [°C]  
 $RH$  = suhteellinen kosteus [%]  
 $W$  = puulaji (0=mänty, 1=kuusi)  
 $SQ$  = pinnan ravinteikkuus (0 = sahapinta, 1 = kuivaamossa vallinnut puun pinta)

Myös homehtumisasteen  $M=3$  saavuttamiseen tarvittavalle ajalle  $t_v$  on käytettävissä vastaava malli. Suhde  $t_m/t_v$  on tarkastelun kannalta mielenkiintoisella alueella likimain vakio, jonka arvo on  $\sqrt{3}$ . Näin ollen on tarkoituksenmukaista olettaa homehtumisasteen kasvavan ajan suhteen parabolisesti alueella  $M=0-3$ . Yhtälö (2) voidaan tällöin tulkita differentiaaliyhtälönä

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)} k_1 k_2. \quad (3)$$

jossa  $k_1$  kuvaa homehtumisnopeutta

$$k_1 = \begin{cases} 1 & \text{kun } M < 1 \\ \frac{2}{\frac{t_v}{t_m} - 1} & \text{kun } M > 1 \end{cases} \quad (4)$$

ja  $k_2$  homeindeksin kasvun hidastumista, kun kasvu alkaa lähestyä huippua eli välillä  $4 < M < 6$ .

$$k_2 = \max[1 - \exp[2.3 \cdot (M - M_{\max})], 0] \quad (5)$$

$M_{\max}$  kuvaa kullekin olosuhteelle maksimaalista saavutettavaa homeindeksiä. Ajan  $t$  yksikkönä käytetään tässä vrk. Alkutilanteessa homeindeksi  $M=0$ , ja kasvu on alkanut, kun saavutetaan homehtumisaste 1. Arvo  $M=3$  merkitsee kuvatulla tavalla visuaalista havaintoa homeen kasvusta.

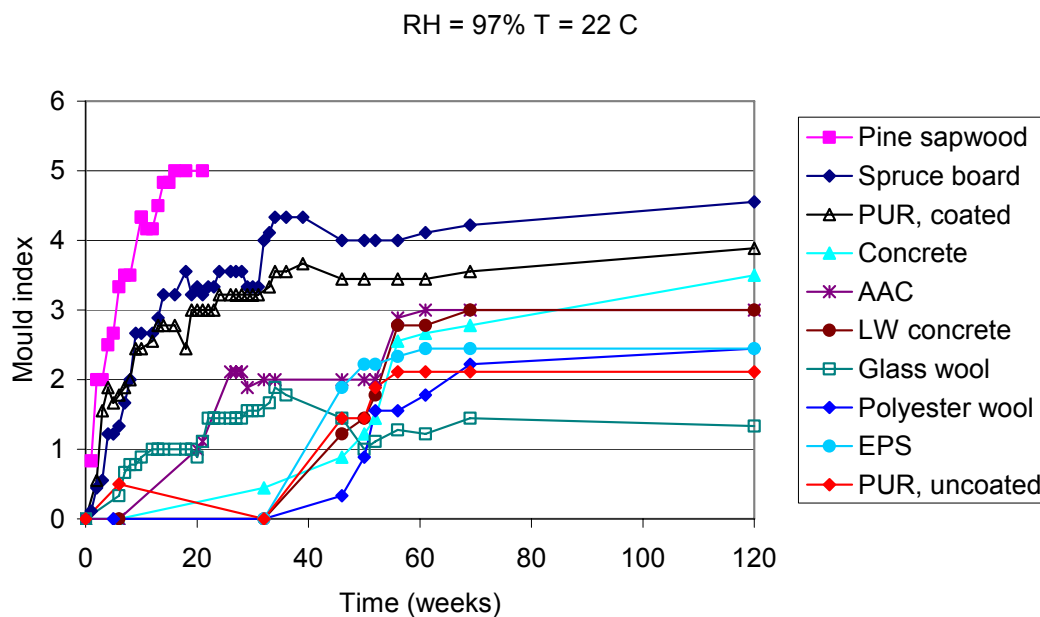
## 2.2 Muita homeen kasvun laskentamalleja

Homeen kasvun tarkastelumallit perustuvat yleensä laboratorio-olosuhteissa saatuihin mittaustuloksiin, joissa erilaisia homesieniä on kasvatettu erilaisilla ravintoalustoilla säädetyissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Tyypillisesti näiden kokeiden tulokset annetaan niin sanottuina isoplet-käyrästeinä, jotka kuvaavat toisaalta homeen itämiseen tarvittavaa aikaa ja toisaalta homeen kasvunopeutta eri lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Näiden isoplet-määritysten pohjalta on laadittu myös matemaattisia tarkastelumalleja. Varteenotettavimpia näistä on saksalaisen Sedlbauerin kehittämä laskennallinen malli, jossa homeen kehittymistä tarkastellaan homeitiön tarvitseman kosteuden kautta. Mallia on hyödynnetty mm. WufiBio-laskentamallissa [6; 7]. Homeitiöille on siinä annettu hygrotermisiä parametriarvoja (sorptiokäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys), mikä mahdollistaa dynaamisen laskennan. Mallissa on kriittiset raja-arvot kolmelle eri materiaaliluokille.

### 3. Homehtumisen mallintaminen eri materiaaleissa

Nyt toteutuneessa TTY:n ja VTT:n Homemalli-tutkimusprojektissa tehtiin kokeita useilla eri rakennusmateriaaleilla puun lisäksi. Tutkittavat materiaalit olivat betoni, kevytbetoni, kevytsorabetoni, kuusi (liimapuulevy), lasivilla, polyesterikuitueriste, polyuretaani (PUR) ja solupolystyreeni (EPS). Polyuretaania oli mukana sekä paperipintaista että hiottupintaista laatua. Referenssimateriaalina kokeissa käytettiin männyn pintapuuta. Kokeita tehtiin sekä yksittäisille rakennusmateriaaleille, että näiden yhdistelmille, jotka simuloivat eri materiaaleista koostuvia tyypillisiä rakenteita. Koeolosuhteet luotiin sekä laboratoriossa että kenttäolosuhteissa. Laboratoriossa tutkittiin sekä vakio- että muuttuvia olosuhteita. Kaikissa kokeissa seurattiin homeiden kasvua joko materiaalien vapaalla pinnalla tai kahden materiaalin kosketuspinnassa. Koejärjestelyt ja niiden tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti hankkeen loppuraportissa [8].

Käsiteltyjä koetuloksia – keskimääräistä havaittua homeindeksin kehittymistä ja arvioitua maksimaalista saavutettavaa homeindeksiä eri materiaaleissa ja eri olosuhteissa – käytettiin homeen kasvuriskin laskentamallin kehittämiseen. Mallin kehityksen lähtökohtana olivat homehtumiskokeiden tulokset, tarkemmin määriteltynä materiaalien laboratoriokokeiden homehtumistulokset. Periaatteena oli työstää homeen kasvuhavainnoista tunnuslukuja, joihin pohjautuen alkuperäistä männyn homemallia voitaisiin soveltaa muille materiaaleille sopivaksi. Kuva 1 havainnollistaa eri materiaalien hyvin erilaisen homehtumisprosessin samoissa vakio-olosuhteissa. Mallintamiseen liittyvät tarkastelut on esitetty tarkemmin lähteessä [8].



Kuva 1. Esimerkki eri materiaalien eri nopeuksilla tapahtuvasta homehtumisesta laboratoriokokeissa vakio-olosuhteissa RH 97 % ja 22°C.

#### 3.1 Homeen itämisprosessi ja kasvunopeus

Analyysissä lähdettiin analogiasta alkuperäisen mallin kanssa, jonka mukaan  $k_I$ :een – joka voidaan myös ymmärtää kasvunopeuden kulmakertoimena – vaikuttaa se aika, mikä suhteessa kuluu siihen, että home on havaittavissa mikroskoopilla ( $M=1$ ) ja paljain silmin ( $M=3$ ). Itämisprosessin ja homeen kasvunopeuden malliin käytettiin havaintoja olosuhteista, joissa RH 97 % ja 22°C. Lukuarvot määriteltiin kolmen rinnakkaiskokeen perusteella asiantuntija-arvioon perustuen. Hajonta näiden kokeiden välillä oli hyvin vähäistä.

Havaintojen perusteella määritettiin se aika, joka kullakin materiaalilla menee tietyn homeindeksin "saavuttamiseen", esim.  $t_{M>0}$ ,  $t_{M=1}$ ,  $t_{M=3}$ . Näitä materiaalikohtaisia arvoja käytettiin kertoimen  $k_1$  määrittämiseen. Kertoimet kuvaavat eri materiaalien homehtumisnopeutta verrattuna alkuperäisen mallin männyn pintapuun homehtumisnopeuteen erikseen

- itämisprosessin aikana kun  $M < 1$ , kaava (6)
- homehtumisen edetessä kun  $M \geq 1$ , kaava (7)

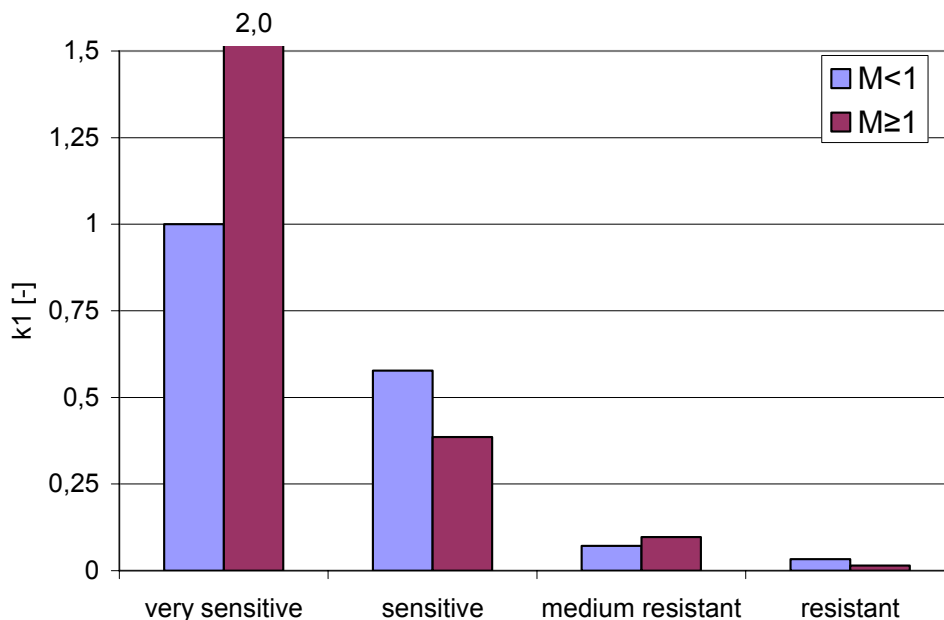
$$k_1 = \frac{t_{M=1, \text{pine}}}{t_{M=1}} \quad \text{kun } M < 1 \quad (6)$$

$$k_1 = 2 \cdot \frac{(t_{M=3, \text{pine}} - t_{M=1, \text{pine}})}{(t_{M=3} - t_{M=1})} \quad \text{kun } M \geq 1 \quad (7)$$

Näille olosuhteille lukuarvona männyn itämisprosessille käytetään arvoa, joka on noin 1,6 viikkoa ( $t_{M=1, \text{pine}}$ ), ja homeen näkymiselle paljain silmin noin 3 viikkoa ( $t_{M=3, \text{pine}}$ ). Vaikka kertoimet määriteltiin materiaalikohtaisesti, ei näin "tarkka", tuotekohtainen homeindeksin määrittely kuitenkaan ole mielekäästä ja siksi materiaalit ryhmiteltiin luokkiin homehtumisalttiuden mukaan (suluissa määrittäysperusteina käytetyt materiaalit):

- sensitive: keskiarvo (höylätty mänty, liimapuu ja pur paperi)
- medium resistant: keskiarvo (betoni, kevytbetoni, lasivilla ja kevytsorabetoni)
- resistant: pienin määritelty arvo

Näiden lisäksi on homehtumisherkkyyden ylärajana "very sensitive" –luokka, joka on alkuperäinen malli männyn pintapuulle. Luokkakohtaiset kertoimet on havainnointu Kuva 2:ssa.



Kuva 2.  $k_1$ -kertoimet ryhmitettynä yksittäisten materiaalien arvojen perusteella.

### 3.2 Maksimaalisen homeindeksin määrittäminen eri materiaaleille

Toinen osa mallin kehitystä oli eri materiaaleille ominaisen maksimaalisen homeenkasvun määrittäminen olosuhteiden funktiona. Edellä määritettiin homeen kasvunopeuden säätely homeen kasvuun otollisimpien koeolosuhteiden perusteella, koska oli tarve saada homeen kehitys mahdollisimman pitkälle. Kuivemmissä ja kylmemmissä olosuhteissa kasvu jää monissa materiaaleissa usein alle  $M=1$ . Kokeiden perusteella oli kuitenkin ilmeistä, että homeen lopputaso on hyvin vahvasti olosuhte- ja materiaaliin riippuvainen. Siksi päätettiin kehittää homeen lopputasolle ( $M_{max}$ ) yhtälö suhteellisen kosteuden RH:n funktiona jokaiselle materiaaliluokalle. Alkuperäisen mallin mukainen yhtälö  $M_{max}$ :lle on:

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (8)$$

jossa  $A=1$ ,  $B=7$  ja  $C=2$ . Lämpötilariippuvuus on mukana  $RH_{crit}$ :ssä, kaava (1).  $M_{max}$  puolestaan on muuttuja laskentamallin toisessa keskeisessä kertoimessa  $k_2$ , kaava (5).

Lähtökohtana olivat havainnot materiaalien vakio-olosuhteiden laboratorioskokeista, joiden perusteella arvioitiin saavutettavissa oleva homeindeksi näissä kussakin olosuhteessa. Näiden käyrien perusteella on määritelty ryhmät  $M_{max}$ :lle  $k_1$ :lle annettujen herkkyysluokkien tapaan ja näin saadaan  $M_{max}$ :lle yhtälöt RH:n funktiona. Funktiot saadaan sovittamalla kaava (8):n toisen asteen funktion "kertoimia". Lopulliset kertoimet ja muut parametrit sekä eri herkkyys/kestävyysluokkien nimet ja näiden lyhennykset löytyvät Taulukko 2:stä.

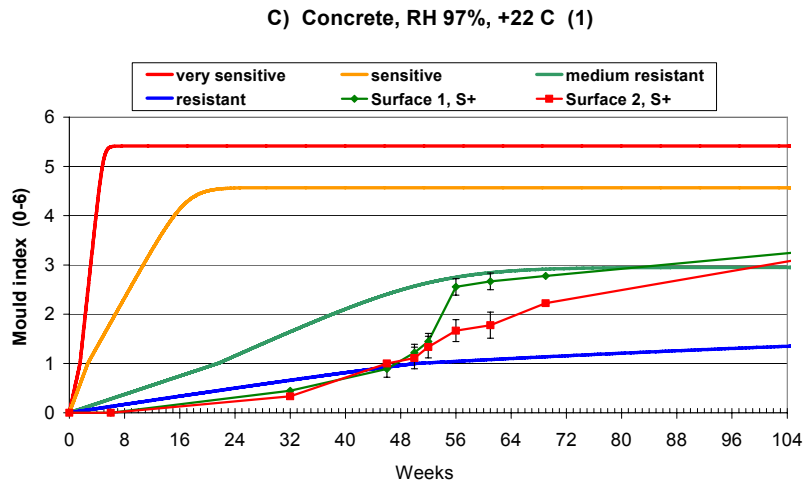
Taulukko 2. Muunnetun homemallin parametrit eri herkkyysluokille.

Homehtumisherkkyys/ kestävyysluokka			$k_1$		$k_2 (M_{max})$			$RH_{min}$
suomeksi	englanniksi	lyhenne	$M < 1$	$M \geq 1$	A	B	C	
hyvin herkkä	very sensitive	vs	1	2	1	7	2	80
herkkä	sensitive	s	0,578	0,386	0,3	6	1	80
kohtalaisen kestävä	medium resistant	mr	0,072	0,097	0	5	1,5	85
kestävä	resistant	r	0,033	0,014	0	3	1	85

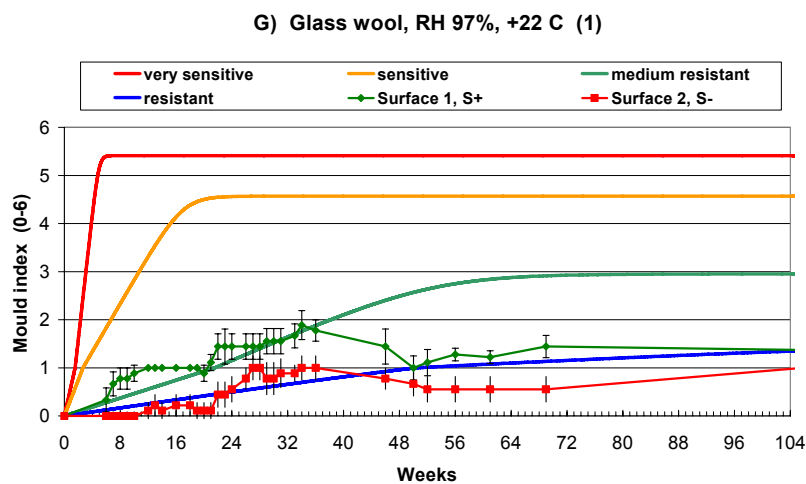
$RH_{min}$  kuvaa suhteellisen kosteuden raja-arvoa, jota kuivemmissä olosuhteissa homehtuminen koetulosten mukaan on hyvin vähäistä.  $RH_{min}$  on osa  $RH_{crit}$  -määritelmää lausekkeessa (1).

## 4. Mallikäyrien ja materiaalikoekeskeiden vertailu

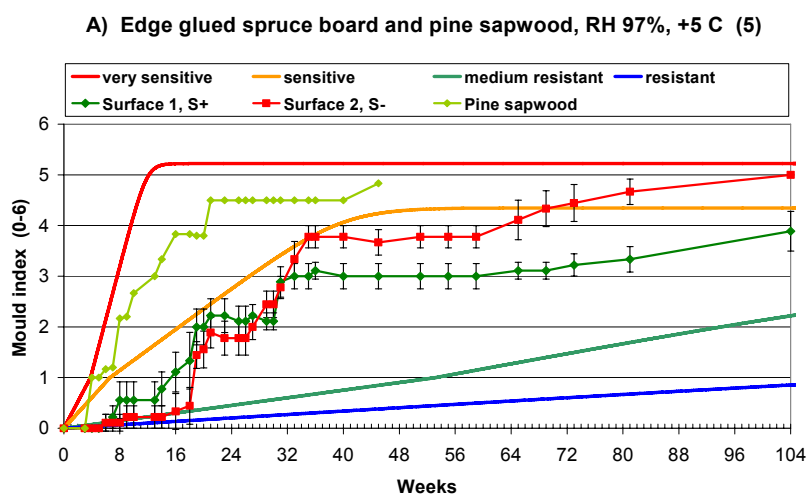
Edellä esitetetyssä analyysissä määritettiin mallinnusta varten materiaaliluokat kuvaamaan toisaalta homehtumisriskiä ja toisaalta homeen kasvun vastustuskykyä. Kaikkein homehtumisherkimmän luokan ylärajaksi valittiin alkuperäinen männyn pintapuun malli. Näiden arvojen perusteella saadaan mallikäyriä, jotka kuvaavat erityyppisten materiaalien homeindeksin kehittymistä eri vakio-olosuhteissa. Kuvissa 3 – 7 esitetään tyypillisiä otteita eri materiaaleissa havaitusta homeen kasvusta ja vastaavasti mallinnetusta kasvusta eri herkkyysluokissa. Mallikäyrät on laskettu toteutuneiden olosuhteiden mukaan.



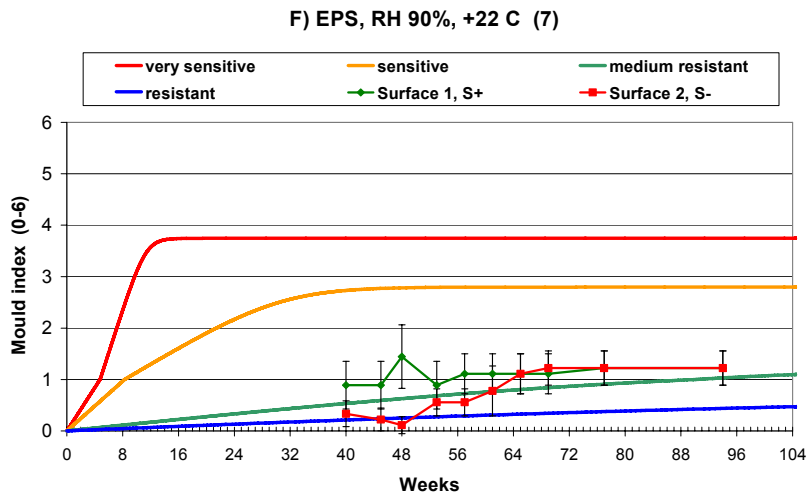
Kuva 3. Homeen kasvun kehittyminen ja mallikäyrät betonille tavoiteolosuhteissa RH 97 % ja 22 °C. Toteutuneet olosuhteet noin RH 96,5 % ja 21 °C.



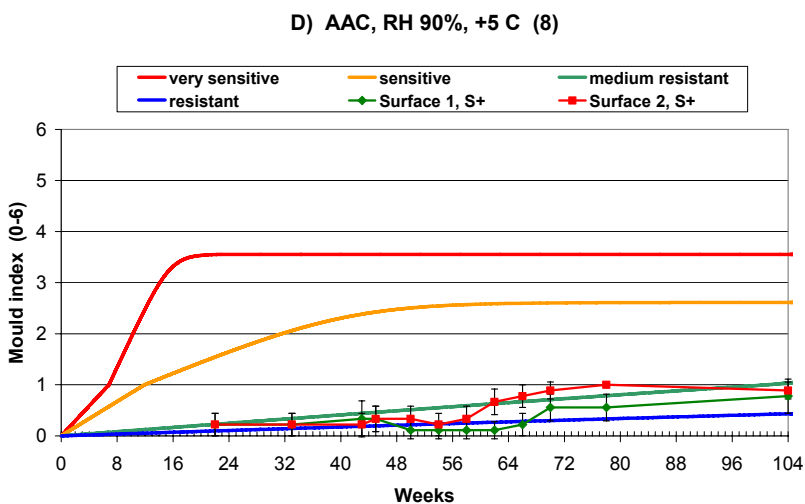
Kuva 4. Homeen kasvun kehittyminen ja mallikäyrät lasivillalle tavoiteolosuhteissa RH 97 % ja 22 °C. Toteutuneet olosuhteet noin RH 96,5 % ja 21 °C.



Kuva 5. Homeen kasvun kehittyminen ja mallikäyrät kuusiliimapuulle ja männyn pintapuulle tavoiteolosuhteissa RH 97 % ja 5 °C. Toteutuneet olosuhteet noin RH 98 % ja 4,5 °C.



Kuva 6. Homeen kasvun kehittyminen ja mallikäyrät EPS:lle tavoiteolosuhteissa RH 90 % ja 22 °C. Toteutuneet olosuhteet noin RH 90 % ja 21 °C.



Kuva 7. Homeen kasvun kehittyminen ja mallikäyrät kevytbetonille tavoiteolosuhteissa RH 90 % ja 5 °C. Toteutuneet olosuhteet noin RH 93,5 % ja 4,5 °C.

## 5. Tulosten tarkastelu

Tässä projektissa määriteltiin mallin homehtumisnopeutta kuvaava osa materiaalien laboratoriokoe 1:n perusteella, koska tämä korkean kosteuden (97% RH) ja lämpimän (22 °C) yhdistelmä oli ainut olosuhde, jossa useimmissa materiaaleissa havaittiin homeenkasvua ainakin indeksi 3:een asti. Indeksi 3:n saavuttaminen oli olennaista kertoimien määrittämisen kannalta alkuperäisen mallin mukaisesta. Muissa olosuhteissa jäätii reilusti tämän alle. Muutamissa materiaaleissa ei saavutettu tasoa  $M=3$  ollenkaan (EPS, lasivilla, polyesterikuitueriste ja PUR), mutta näille materiaaleille määriteltiin laskennallinen arvio  $M=3$  saavuttamiseen tarvittavasta ajasta, jotta kertoimien määrittäminen onnistuisi.

Maksimaalista homeindeksiä kuvaavaan mallin osaan käytettiin havaintoja kaikista vakio-olosuhteiden laboratoriokokeista. Nämä maksimaaliset arvot kahden vuoden kuormituksen perusteella perustuvat asiantuntija-arvioon ja ovat siksi osittain teoreettisia. Ne on kuitenkin pääsääntöisesti määritelty niin sanotusti "varman päälle". Mutta koska kyseessä on arvio, tulee

mallintamistulokset käsittää suuntaa-antavina riskitarkasteluina eikä absoluuttisina ja tarkkoina arvoina.

Mallin käyttöön riskitarkasteluajattelun mukaisesti kuuluu myös sen antamat homeen kasvun vastustuskykyä ja toisaalta herkkyyttä kuvaavat kategoriat. Karkeasti ottaen materiaalit siis voidaan mallin perusteella jaotella herkkiin ja vastustuskykyisiin ja johonkin siltä väliltä. Koska pinnoitteet ja erityisesti epäpuhtaudet vaikuttavat paljonkin materiaalien ominaisuuksiin homeen kasvun kannalta, on aina arvioitava mallinnuksen tulokset suhteessa mallinnettuun tapaukseen ja sen reunaehtoihin. Koetulosten – sekä aikaisempien tutkimusten että tämän tutkimuksen tulosten – pohjalta tehdyn homeen kasvun mallintamisen perusteella eri materiaaleja voidaan jakaa seuraavasti eri herkkyytsluokkiin homeen kasvun riskin suhteen (Taulukko 3):

*Taulukko 3. Rakennusmateriaalien jako kestävyys ja herkkyytsluokkiin homeen kasvun riskin suhteen. Luokat määriteltiin parannettuun malliin.*

Homehtumisherkkyys / kestävyysluokka		
suomeksi	englanniksi	Materiaalit
hyvin herkkä	very sensitive	käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	sensitive	höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
kohtalaisen kestävä	medium resistant	sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	resistant	lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Luokitus ei kuitenkaan ole täysin yksioikoista: Homeet herkästi homehtuvassa materiaalissa eivät välttämättä ole niin toksisia tai haisevia kuin homeet huonommin homehtuvissa. Kestävämmissä materiaaleissa homeet joutuvat taistelemaan ja mikrobien antagonismivaikutuksesta ne kehittävät kemikaaleja, jotka voivat olla haitallisia myös ihmiselle. Tässä projektissa on kuitenkin pitäyditty homeen **kokonais**kasvun visualiseen (sekä mikroskoopilla että paljain silmin havaittuun) määrittelyyn. Tämä edellyttää, että hyväksytään erityyppisten homeiden "niputtaminen" joukoksi, jonka yhteiskäyttämiseksi eri kasvuympäristöissä annetaan lukuarvo. On vain tiedostettava se, että todellisuudessa eri homeet kasvavat hyvinkin eri lailla ja siksi homeindeksin matemaattinen laskenta esittää keskimääräisen odotettavissa olevan homeen **kokonais**kasvun.

## 6. Yhteenveto

Mallinnuksen ja koko tämän hankkeen tärkeänä tavoitteena oli kehittää jo olemassa olevaa, VTT:ssä vuosien varrella kehitettyä homeen laskennallista mallia siten, että sen avulla paremmin voitaisiin arvioida erityyppisten rakennusmateriaalien homehtumisherkkyttä todellisissa olosuhteissa. Koejärjestelyt oli suunniteltu siten, että saataisiin tietoa yksittäisten materiaalien homehtumisnopeudesta ja sen maksimaalisesta tasosta eri lämpötila- ja kosteusolosuhteiden funktiona. Mallin kehityksessä hyödynnettiin alkuperäistä männyn pintapuulle tehtyä mallia. Malliin tehtiin korjauksia niin, että sillä voidaan tarkastella myös muita rakennusmateriaaleja. Mallin avulla voidaan nyt arvioida erityyppisten materiaalien homehtumisalttiutta erilaisia oloissa ja vaikutusajoissa.

Tulosten perusteella voitiin eri materiaalityyppien homeen kasvuherkkyys ja kasvutasot mallintaa. Mallintamisen materiaaliluokat jaettiin homehtumisherkkyyden mukaan, eikä eri materiaaleja nimetty tarkasti johonkin luokkaan kuuluviksi. Mallin tarkennus esitetyllä tavalla paransi eri materiaalien homehtumisriskin arviointitarkkuutta.

Laskennan antamaa ennustetta arvioitaessa tulee aina muistaa, että matemaattisen mallin vaatima ilmiön yksinkertaistaminen – tässä home biologisena ilmiönä – ei koskaan täydellisesti kuvaa homeen biologista kasvukäyrää. **Laskentamallin tehtävänä on auttaa riskin mahdollisuuden ja suuruusluokan määrittämisessä.**

## Kiitokset

Rahoitus Tekesiltä, VTT:stä ja useilta rakennusalan yrityksiltä mahdollisti tämän 4-vuotisen tutkimushankkeen "Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)". Kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille henkilöille.

## Lähdeluettelo

- [1] Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report no 221. 40 p + app 9 p
- [2] Viitanen, H. & Bjurman, J. 1995. Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. *Mat. und Org.* 29(1): 27-46..
- [3] Salminen, K., Viitanen, H., Paajanen, L., Lähdesmäki, K., Strander, T., Vinha, J., Iitti, H., Ojanen, T. & Peuhkuri, R. Rakennusmateriaalien homehtuminen laboratorio- ja kenttäkokeissa. *Rakennusfysiikka 2009*.
- [4] Hukka, A. and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*. 33 (6) 475-485.
- [5] Viitanen, H., Hanhijärvi, A., Hukka, A. and Koskela, K. Modelling mould growth and decay damages In: Seppänen, O. & Säteri, J. (ed). *Healthy Buildings 2000*. Vol. 4. FiSIAQ, s. 341 - 346.
- [6] Sedlbauer, K. 2001. Prediction of mould fungus formation on the surface of/and inside building components. University of Stuttgart, Fraunhofer Institute for building Physics, Thesis. Stuttgart. Germany.
- [7] Sedlbauer K. & Krus, M. (2003). A new model for mould prediction and its application in practice. In *Research in Building Physics*. Ed. by Carmelit et al. Proc. of 2nd International conference on Building Physics.
- [8] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T. & Iitti, H. 2009. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaistaan vuonna 2009.



# Homeen kasvun mallintaminen vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa

Tuomo Ojanen<sup>1</sup>, Ruut Peuhkuri<sup>1</sup>, Hannu Viitanen<sup>1</sup>, Juha Vinha<sup>2</sup> ja Kimmo Lähdesmäki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus

<sup>2</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Tämä esitelmä on osa artikkelisarjaa, joka perustuu TTY:n ja VTT:n vastapäättyneeseen nelivuotiseen tutkimushankkeeseen "Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)". Tutkimuksen tavoitteena oli laajentaa aikaisempaa VTT:n puumateriaalille pohjautuvaa homeen kasvun mallia myös muille rakennusmateriaaleille sopivaksi sekä parantaa mallin toimintaa muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa.

Tässä paperissa tarkastellaan kahdeksan eri rakennusmateriaalin ja niistä koostuvien rakenteiden hometason muutosta homeen kasvun kannalta epäedullisissa olosuhteissa. Tämä homeen taantumaksi kutsutun ilmiön matemaattista mallia voitiin täydentää laboratorio-olosuhteissa tehtyjen noin 3 kuukauden pakkasjakson aikaisten hometason muutosten perusteella.

Tarkennetun mallin tuloksia verrattiin kenttäolosuhteissa olleisiin materiaali- ja rakennekokeisiin.

Valitsemalla kasvuolosuhteita kuvaavat homeen kasvukertoimet ja taantumien kertoimet materiaaliryhmiä kuvaaviksi, voidaan homeen kehitystä mallintaa aiempaa tarkemmin.

On ilmeistä, että materiaalien rajapinnan homehtuminen poikkeaa siitä, mitä yksittäisen materiaalin pinnalla tapahtuu. Pohjamateriaalien herkkyys vaikuttaa homeen kasvunopeuteen, kasvun maksimitasoon ja taantumiaan.

## 1. Johdanto

Homekasvun numeerisen mallintamisen edellytyksenä on tuntea homeen kasvunopeuden lisäksi kasvulle epäedullisten olosuhteiden vaikutus kasvun määrää kuvaavaan homeindeksiin. Pinnan havainnoinnilla todetun homeindeksin pienentyminen ja sen kasvuunlähtö olosuhteiden muuttuessa taas homeelle suotuisiksi on tunnettava kohtuullisella tarkkuudella, jotta eri vuodenaikoina esiintyvien olosuhteiden vaikutus homeen kehittymiseen voidaan kuvata numeerisesti. Lähtökohtana on puumateriaalille määritetty homeindeksin tason alentuminen, joka tapahtuu ensimmäisen vuorokauden aikana jaksoissa ja sen jälkeen vakionopeudella [1; 2]. Seuraavassa kuvataan homeen kasvun taantumien määrittämistä eri materiaaleille ja tulosten soveltamista rakennekokeiden havaintoihin.

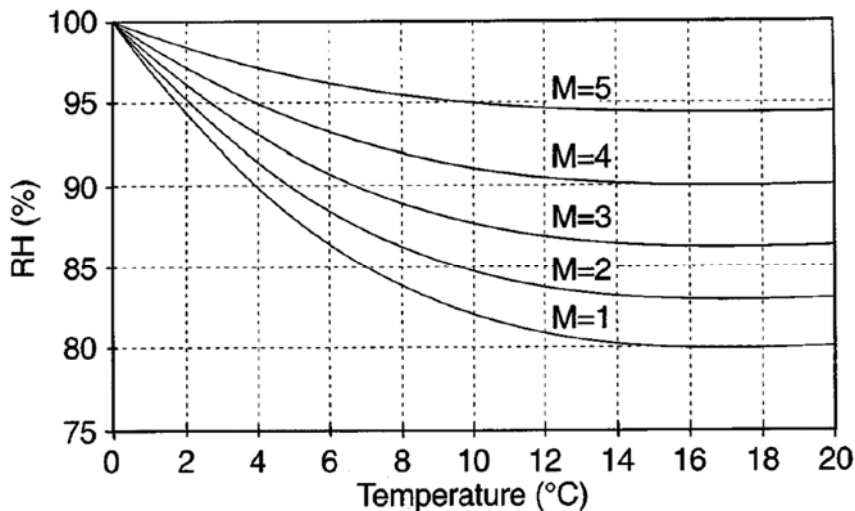
## 2. Homekasvun taantuminen kasvualueen ulkopuolella

### 2.1 Taantumien merkitys

Kuva 1 esittää VTT:n homemallin [1 - 4] lämpötila- ja kosteusolosuhteet, joilla saavutetaan eri luokitustasojen mukaiset homeindeksien maksimi-arvot mäännöllä. Tason  $M=1$  alapuolella home ei kasva ja oletuksen mukaisesti homeindeksi alkaa pienentyä. Tämä indeksin pienentyminen kuvaa materiaalin pinnalla hometasossa havaittavaa muutosta. Homekasvun vähentymisen havainnointi on huomattavasti hankalampaa kuin homeen kasvun. Kuivuvan ja katkeilevan rihmaston määrän

arviointi erilaisilla materiaalipinnoilla on epävarmempaa kuin kasvun etenemisen tulkinta ja siten taantuvan homeen kasvutason havainnoissa esiintyy suurta hajontaa.

Laskennallisessa homeen kasvun arvioinnissa, esimerkiksi WufiBio-laskentamallissa [5; 6], homeen määrää kuvaava luku [mm] ei pienene kasvulle epäedullisissa olosuhteissa. Tässä mallissa ei myöskään ole määritetty homekasvun maksimiarvoa, joten se voi jatkua loputtomiin. Kasvun arvio perustuu laboratorioissa saatuihin rihmaston kasvuennusteisiin (kasvun läpimitta kasvualustalla). VTT:n malli sitä vastoin kuvaa paremmin olosuhteiden vaihtelun ja alemman kosteuskuormituksen vaikutusta homeen kehittymiseen.



Kuva 1. Homeen kasvulle suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet, joilla saavutetaan eri luokitustasojen mukaiset homeindeksien maksimiarvot [3]. M1 = kasvun alkaminen, M3 = kasvun näkyminen paljain silmin ja M5 = lähes koko kappaleen ala on homekasvun peitossa.

Homeindeksin pienentyminen tapahtuu alkuperäisessä mallissa vakionopeudella lukuun ottamatta taantumajakson ensimmäisen vuorokauden aikaista jaksotusta (yhtälö 1). Kun olosuhteet materiaalipinnassa muuttuvat hetkellä  $t_1$  kasvualueelta sen ulkopuolelle, pienenee homeindeksi kuuden ensimmäisen tunnin aikana suhteellisen voimakkaasti. Sen jälkeen on muutokseton tilanne 24 tuntiin saakka, minkä jälkeen muutos indeksissä jatkuu vakionopeudella. Puulle annettujen kertoimien perusteella tasolle  $M = 1$  kohonnut homeindeksi alenee kasvuolosuhteiden ulkopuolella nolnaan noin kahdessa kuukaudessa.

Jaksotus taantumanopeudessa kuvaa lähinnä vuorokausitason dynaamisesta vaihtelusta aiheutuvaa kasvun uuden käyntiinlähdon viivettä puulla. Eri materiaalien pitkien taantumajaksojen kuvaaminen yhdellä indeksin vakionopeudella tapahtuvalla alenemisella on oletus, joka voi johtaa useiden vuosien tarkastelujakson aikana virheelliseen ennusteeseen homekasvun tasosta. On ilmeistä, että homeen taantuminen tapahtuu eri materiaaleissa ainakin osittain toisin kuin mitä alkuperäisessä mallissa on esitetty puun homeindeksin taantumalle.

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.00133, & \text{kun } t - t_1 \leq 6 \text{ h} \\ 0, & \text{kun } 6 \text{ h} \leq t - t_1 \leq 24 \text{ h} \\ -0.000667, & \text{kun } t - t_1 > 24 \text{ h} \end{cases} \quad (1)$$

missä  $M$  = homeindeksi [0, 6]  
 $t$  = aika (h) muutoshetkestä  $t_1$ .

## 2.2 Taantuman mallin tarkennus eri materiaaleille

### 2.2.1 Rakennekokeet

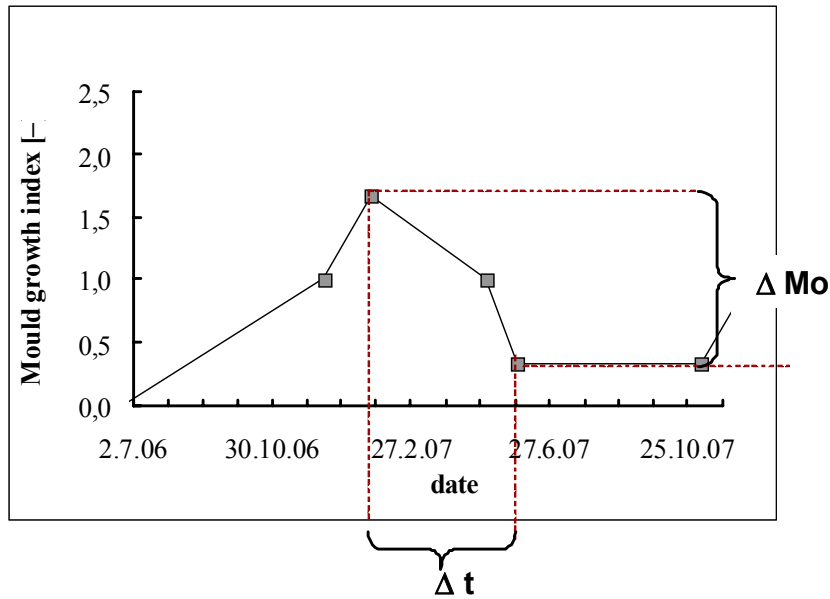
Koska homeindeksin alentuminen pitkäaikaisten, homeen kasvulle epäsuotuisten olosuhteiden aikana on alkuperäisessä mallissa eräs merkittävimpiä epävarmuustekijöitä [7-9], pyrittiin tälle määrittämään nykyistä luotettavammia arvoja. Homeindeksin taantuman tarkasteluun valittiin laboratoriossa tehdyt rakennekokeet, joissa kriittinen, homehtuva tarkastelukohta oli lämmöneristeen ja sitä vasten olevan toisen materiaalin (ns. runkomateriaalin) rajapinta.

Dynaamiset kokeet tehtiin eri vuodenaikojia kuvaaville rasiutilanteille ja rajapinnan lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin jatkuvasti. Tällaisissa viikkojen ja kuukausien pituisia kuivia tai kylmiä jaksoja sisältävissä homekasvun seurantakokeissa saatiin esiin vuodenajan vaihtelua vastaavia homeen kasvun ja taantumisen ilmiöitä eri materiaaleille. Tarkastelupintaan rajoittuvien materiaalien pintojen homehtumisaste määritettiin mikroskooppisin ja silmämääräisin havainnoin kunkin rakenteen osalta rajapinnan molemmiin puolin olevien materiaalien pinnoista kolmesta kohdasta rakennetta. Lisää koejärjestelyistä ja mallintamisen tuloksista lähteessä [11].

Rakennekokeiden etuna yksittäisten koekappaleiden kosteusrasituksen aiheuttamiin homehtumishavaintoihin verrattuna on mm. se, että tarkasteltava rajapinta on suojassa rakenteen sisällä. Suojaamattomassa koekappaleessa pinnan homekasvustoa voi irrota ilmvirtausten vaikutuksesta ja rajapinnan muuttuvien olosuhteiden mittaus on varmempaa kuin ilmatilaa vastaan olevien pintojen. Lisäksi kerroksellinen tilanne vastaa parhaiten fyysisiä olosuhteita todellisissa rakenteissa ja niissä esiintyvissä rajapinnoissa.

Kokeiden alkuvaiheessa, koejakso 1:ssä käynnistyneen homeen kasvun jälkeen seurasi kylmä jakso (koejakso 2; ns. talvijakso), jonka aikana tapahtuneet muutokset homeindeksin tasoissa antoivat tarvittavaa tietoa homekasvun taantumasta. Tarkasteltavan rajapinnan lämpötila oli ns. talvijaksolla rakenteesta riippuen noin  $-8 \dots -5$  °C ja koesarjasta riippuen kestoltaan 4-6 kuukautta. Tämän jakson aikaisen homeindeksin muutosta käytettiin kuvaamaan materiaaleissa jo kasvaneen homeen taantumista.

Kuva 2 esittää kokeiden pakkasjakson ajalta määritettyä homeindeksin muutosta, jonka perusteella voidaan määrittää arvio homeen pitkäaikaisen taantuman nopeudelle  $\Delta M_o/\Delta t$  kyseisen materiaalin pinnassa.



Kuva 2. Pakkasjakson  $\Delta t$  aikana havaittu homeindeksin alentuminen  $\Delta Mo$  antaa arvion homeen taantumisen nopeudelle eri materiaaleissa.

### 2.2.2 Tulokset ja niiden tulkinta

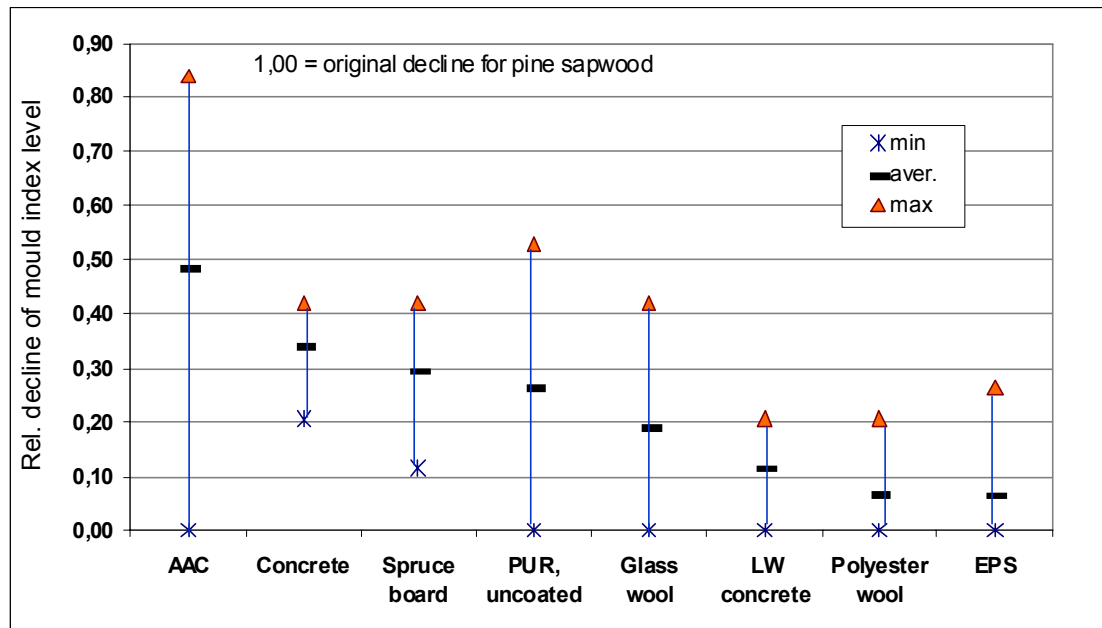
Rakennekokeissa tarkasteltujen rajapintojen eri materiaalien homeindeksihavainnoista määritettiin pakkasjakson homeen taantumisennopeudet. Jokaisesta kokeesta oli käytettävissä kolme rinnakkaista havainnointikohtaa.

Käyttökelpoisin tapa on esittää taantumisennopeus puun vakioarvoon suhteutettuna kertoimena (2)

$$\frac{dMo}{dt}_{mat} = C_{mat} \cdot \frac{dMo}{dt}_0 \quad (2)$$

missä  $(dMo/dt)_{mat}$  = homeen taantumisennopeus kussakin materiaalissa  
 $(dMo/dt)_0$  = homeen taantumisennopeus alkuperäisen mallin mukaan puussa  
 $C_{mat}$  = materiaalikohtainen suhteellinen kerroin homeen taantumisennopeudelle.

Kuva 3 esittää pitkäaikaisen pakkasjakson vaikutuksen homeindeksin taantumisennopeuden suhteelliseen arvoon, kun vertailukohtana on alkuperäisessä mallissa puulle (mänty) esitetty vakiotaso. Tulosten hajonta on suuri. Betonilla ja kuusen liimapuulla havaittiin kaikissa havaintokappaleissa hometason alentuminen pakkasjakson aikana. Muilla materiaaleilla oli ainakin yksi havainto, jossa homeindeksi pysyi pakkasjakson aikana vakiona, ts. taantuma oli nolla. Kolmen havaintokohdan keskiarvo oli nolosta poikkeava kaikilla materiaaleilla, joten kaikilla tarkastelussa käytetyillä materiaaleilla havaittiin homeindeksin alentuminen pakkasjaksolla.



Kuva 3. Homeen taantumanopeuden suhteellinen arvo ( $C_{mat}$ ) verrattuna alkuperäisessä mallissa puulle (mänty) esitettyyn.

Tulosten perusteella pitkän pakkausjakson aiheuttama homeindeksin alentuminen voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Merkittävä taantuma, jossa homeindeksin suhteellinen muutos puun vastaavaan arvoon verrattuna ( $C_{mat}$ ) on noin 0,5
- Jonkinasteinen taantuma, jossa kerroin  $C_{mat}$  on noin 0,25
- Lähes vakiona pysyvä, kerroin  $C_{mat}$  on noin 0,1.

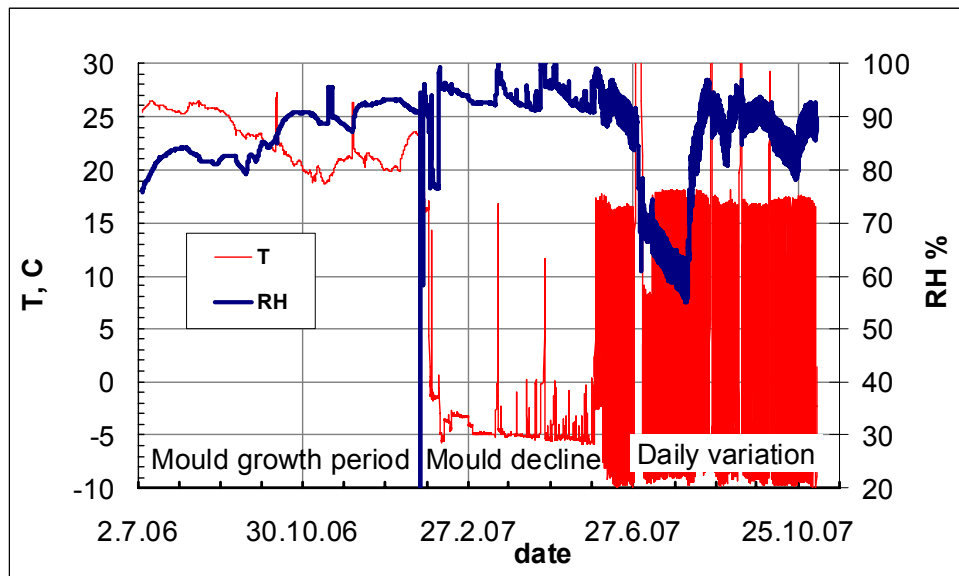
Koska käytävissä olleiden koetulosten määrä oli varsin rajallinen ja hajonta suurta, voidaan eri taantumaa eri materiaaleissa arvioida vain suhteellisen karkeasti. Esitetty luokittelu on siten lähinnä suuntaa-antava. Taantumaa eri luokilla pyritään yksinkertaistamaan sen laskennallista käsittelyä, mutta materiaaleja ei voida tarkasti sijoittaa yhteen luokkaan.

### 3. Pitkäaikaiskokeiden laskennallinen simulointi

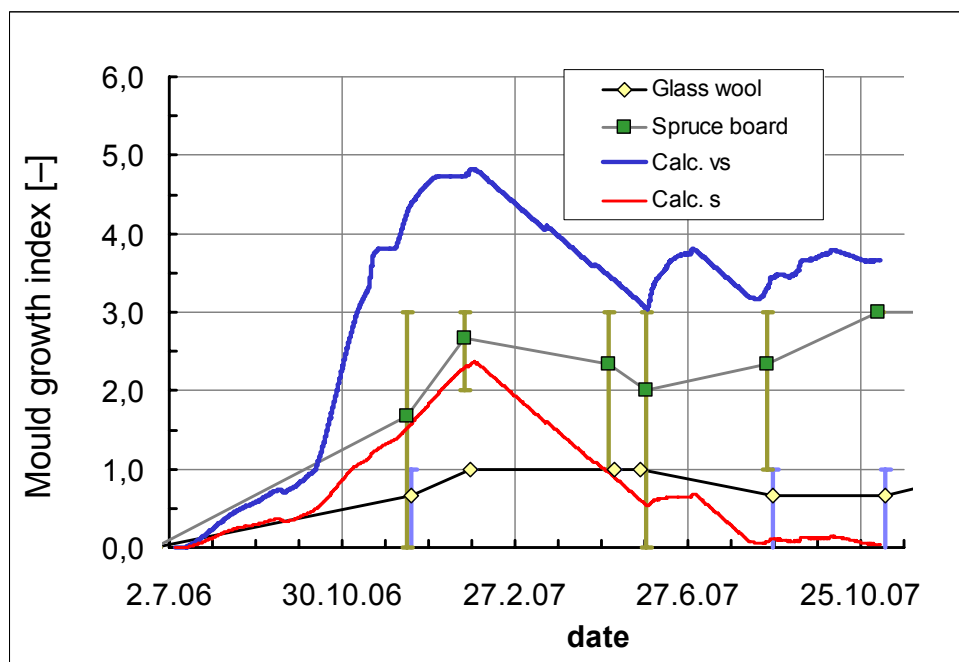
Tässä kappaleessa sovelletaan homeen kasvun ja taantumaa herkkyyksiluokkia tarkkaan monitoroituihin rakennuskokeisiin. Kokeissa kahden materiaalin (lämmöneriste/muu materiaali) rajapinnan lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin koko kokeen ajan. Olosuhteiden perusteella voitiin numeerisesti arvioida rajapinnan homehtumista tarkennetun mallin avulla. Laskennallisesti määritetyt homeindeksin arvot verrattiin kokeissa havaittuihin.

#### 3.1 Koeolosuhteet ja homekasvun simulointi

Kuva 4 esittää erään pitkäaikaiskokeen olosuhdemittausten tulokset kuusiliimapuun ja lasivillan rajapinnalla ja Kuva 5 vastaavasti olosuhteiden perusteella lasketut homeindeksin arvot. Kuvan 5 tapauksessa käytettiin hyvin herkästi homehtuvan (vs) ja herkän (s) materiaalin homekasvuoletuksia [10], mutta taantuma oli alkuperäisen mallin mukaisesti puulle annettu arvo.



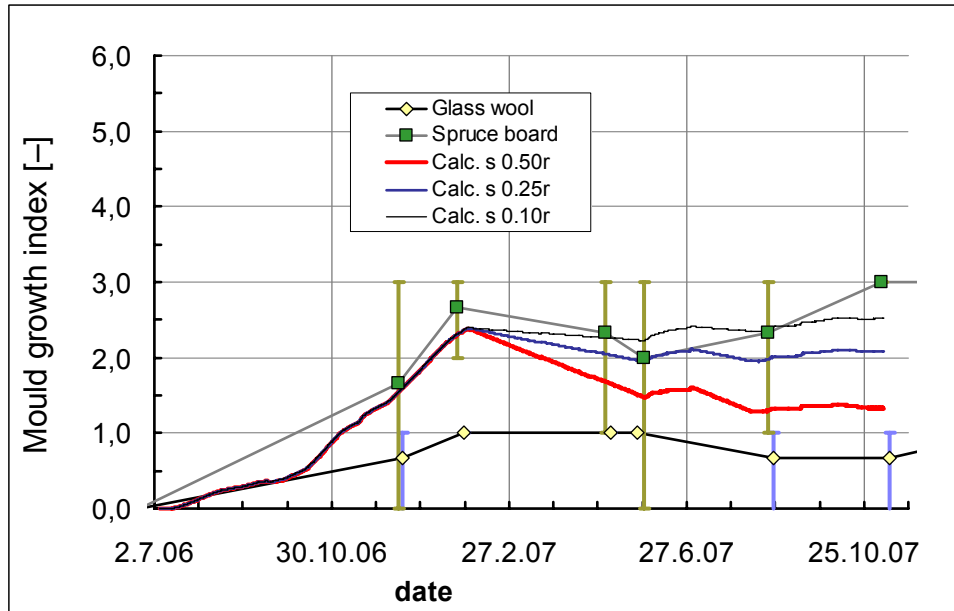
Kuva 4. Kuusen liimapuulevyn ja lasivillan rajapinnalla mitatut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot kokeen aikana. Alkuvaiheessa oli homeen kasvujakso, jota seurasi pakkaskausi. Tämän jälkeen olosuhteet vaihtuivat vuorokauden aikana kasvun ja taantuman välillä.



Kuva 5. Alkuperäisen mallin mukaisesti puun taantuman oletuksella lasketut homeindeksit hyvin herkän (vs) ja herkän (s) materiaalien kasvukertoimilla. Vertailukohtana mitatut arvot hajontoineen.

Kuva 6 esittää saman tilanteen simuloinnin silloin, kun homekasvun taantumaa korjattiin eri kertoimilla edellä esitetyn mukaisesti. Homeindeksin taantuman suhteellisina kertoimina alkuperäisen mallin puun taantumaa verrattuna käytettiin arvoja ( $C_{mat}$ ) 0,50, 0,25 ja 0,10. Kerroin 0,25 vastaa alustavan arvion mukaan parhaiten tässä tarkasteltuja materiaaleja. Herkästi homehtuva materiaaliluokka (s), jonka homeen taantumakerroin on 0,25, antoi hyvin kuusen keskimääräistä kasvua vastaavat tulokset. Kuusi sijoittuu materiaaliluokan herkän homeenkasvun alueelle, mutta lasivilla on lähempänä kohtalaisen kestävä (mr) aluetta.

Rajapinnalla homeutumisenopeus poikkeaa yksittäisen materiaalin pinnalla tapahtuvasta ja siksi tilannetta arvioitiin laskennallisesti käyttämällä tästä poikkeavia kertoimia. Rajapinnalle alkuvaiheessa lisätty suspensiooliuos edisti homeen kasvuun lähtöä. Toinen kasvunopeuteen vaikuttanut tekijä kahden eri materiaalin rajapinnalla on herkemmin hometta kasvavan materiaalin vaikutus molemmiin puolin rajapintaa havaittua kasvua ilmeisesti edistäen. Koska alkuvaiheen homeen kasvu oli rakenteen materiaaliluokkien oletusarvoista poikkeavaa, laskettiin homeutumisenopeus käyttäen rajapinnan herkimmän materiaalin kertoimia.

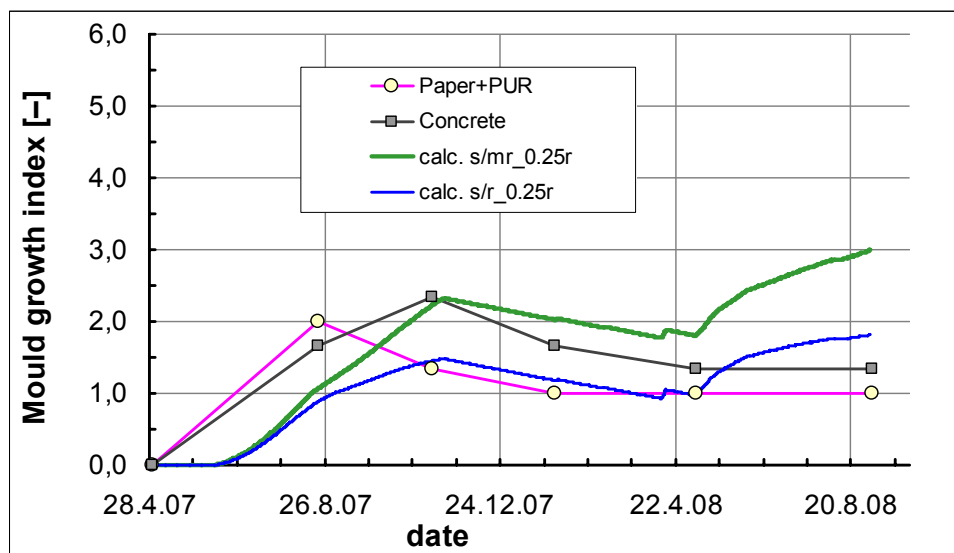


Kuva 6. Taantuman korjatuilla kertoimilla lasketut homeindeksit ja niiden vertailu kokeissa havaitun homekasvun indeksitasoihin. Homeindeksin taantumanopeutta kuvattiin männyn taantumaa suhteutetuilla kertoimilla  $C_{mat} = 0,50, 0,25$  ja  $0,10$ . Homeen kasvu rajapinnalla on laskennassa arvioitu rajapinnan herkemmin homehtuvan (sensitive, s) materiaalin mukaan.

Edellä esitetyillä rajapinnan homekasvun simuloinnin periaatteilla tarkasteltiin muitakin rakennekokeita. Alussa kasvu oli nopeaa, rajapinnan herkemmän materiaalikerroksen mukaan tapahtuvaa ja homekasvun taso rajoitettiin materiaalipohjan mukaan. Taantumalle sovellettiin alustavia arvioita sen suuruusluokasta eri materiaaleissa.

Kuva 7 esittää paperipintaisen PUR-eristeen ja betonin rajapinnan mitatun ja lasketun homeutumisen vertailun. Herkimmin homehtuva pinta on paperipintaisen PURin, joka on herkkä (sensitive, s) materiaali. Molempien materiaalien homeen suhteellinen taantumisnopeus ( $C_{mat}$ ) on luokkaa 0,25 verrattuna alkuperäisen mallin mukaiseen arvoon. Kokeilussa rajoitettiin homeen kasvua kohtalaisen kestävä (medium resistant, mr) ja kestävä (resistant, r) materiaalin mukaan.

Numeerisesti simuloidut tulokset vastaavat kohtuullisen hyvin mitattuja. Herkän materiaalin kasvunopeus ja hometason rajoitus kohtalaisen kestävä materiaalin mukaan antaa parhaiten kasvun riskiä kuvaavan tuloksen. Maksimihometaso on noin  $M_o = 2$ , mikä on sama kuin molempien rajapinnan materiaalien maksimitaso. Homeindeksin alentuminen taantumavaiheessa on myös hyvin mitattua vastaavaa. Sen sijaan päiväsykliin aikainen kasvu oli laskennan perusteella nopeampaa kuin mittauksissa. Samansuuntainen kasvukäyrä hieman alemmalla hometasolla saatiin rajoittamalla homekasvu kestävä (r) materiaalin mukaan. Laskentatulos on varmalla puolella, ts. laskenta korostaa riskiä, kuten sen pitääkin.



Kuva 7. Rakenteiden laboratorikokeessa olleen yhden rakenteen rajapinnan olosuhteiden mukaan simuloitu homeen kasvu ja sen vertailu koerakenteessa havaittuun kasvun tasoon.

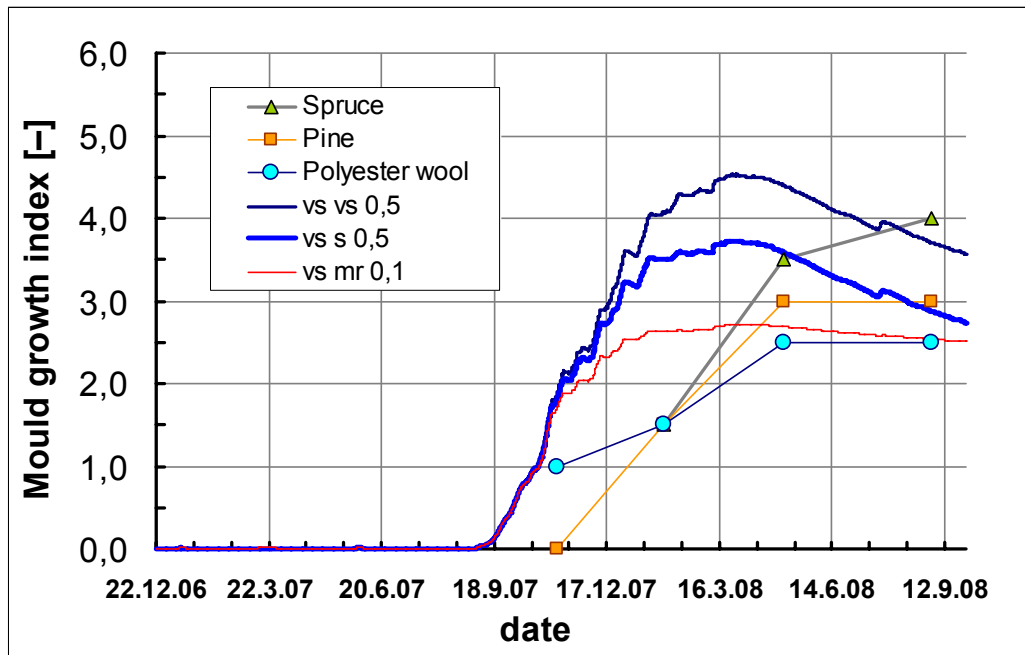
### 3.2 Rakenteiden kenttäkokeiden simulointi

Rakenteiden kenttäkokeita tehtiin TTY:n koekentällä koemökissä, jonka seinärakenteissa seurattiin puumateriaalin (mänty tai kuusiliimapuulevy) ja pehmeän eristemateriaalin (polyesterikuitueriste tai lasivilla) yhteisen rajapinnan homehtumista. Seuraavassa tarkastellaan rajapinnasta mitattujen tunnitaiten lämpötila- ja suhteellinen kosteus -arvojen perusteella laskettua homeindeksiä. Kokeissa pyrittiin tuottamaan rajapinnalle olosuhteet, joissa tapahtuisi riittävä homeen kasvu. **Siten käytetyt rakenteet ovat kosteustekniseltä toimivuudeltaan tahallisen virheellisiä ja tulosten tavoitteena on vain laskentamallin toimivuuden varmistaminen.**

Kuva 8 esittää kenttäkoeseinän olosuhteiden perusteella kuusen ja männyn sekä polyesterikuitueristeen rajapinnalle lasketut tulokset ja niiden vertailun kokeissa havaittuihin. Alkuvaiheen voimakas kasvu aiheutui ilmeisesti suspensioliuoksen homeen kasvua edistävästä vaikutuksesta. Ilman ylimääräistä kasvupohjaa ei esimerkiksi polyesterikuituisessa eristemateriaalissa kasvaisi hometta. Suspensioliuoksen käyttö pinnassa mahdollisti homekasvun käyntiinlähden kokeen aikana ja se edusti rakenteessa pitkään ollutta, likaantunutta pintaa.

Laskennassa rajapinnalle käytettiin erittäin herkän (very sensitive, vs) kasvunopeutta ja homekasvun tasoa rajoittavana joko erittäin herkän (vs), herkän (s) tai kohtalaisen kestävä (mr) materiaalin ominaisuuksia. Homeen taantumien suhteellinen kerroin sai herkkyydestä arvot 0,5 ja 0,1. Näin valitut rajapinnan ominaisuudet antoivat kohtuullisesti mitattuja vastaavia tuloksia homeen kasvulle, vaikka taantumaa ei kokeiden perusteella voitukaan havaita. Tulos korostaa vaikeutta kuvata homeen taantuma - niin kuin kasvunopeutta - laskennallisesti oikein, kun sen kokeellinen havainnointikin antaa varsin suurta vaihtelua edustavia tuloksia. Ilman taantumien mallintamista laskettu hometaso olisi kuitenkin huomattavasti korkeampi ja homeen kasvuriski näyttäisi todellista suuremmalta. Olennaista homeen numeerisessa simuloinnissa on pystyä kuvaamaan homeen kasvun riskiä oikealla tasolla.





Kuva 8. Kenttäkoeseinän homehtumisen numeerinen simulointi ja sen vertailu havaintoihin.

### 3.3 Materiaalien rajapinnan homekäyttämisen mallinnus

Ohessa on esitetty joitain johtopäätöksiä rakennekokeiden laskennan ja kokeiden tulosten vertailusta.

- Homeen kasvu kahden materiaalin rajapinnalla tapahtuu yleensä herkemmin homehtuvan materiaalin homehtumisnopeudella.
- Rajapinnan homehtumisen alin kosteus  $RH_{min}$  määräytyy herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan.
- Rajapinnan materiaalien homehtumisen maksimi-arvo tulee rajoittaa erikseen kummankin pohjamateriaalin mukaan, ts. vaikka kasvunopeus on herkimmän mukaan tapahtuva, ei homeindeksi saa kohota tarkasteltavan pohjamateriaalin edellyttämää kasvutason korkeammaksi.
- Homeen pitkäaikainen taantuminen tapahtuu pohjamateriaalin mukaan.

## 4. Yhteenveto

Homekasvun numeerinen simulointi dynaamisessa tilassa edellyttää, että tarkasteltavista materiaaleista tunnetaan niiden

- Homehtumisherkkyys,
- Olosuhteista riippuva maksimihometaso ja
- Taantuma homeen kasvualueen ulkopuolisissa olosuhteissa.

Rakenteissa materiaalien rajapintojen homekäyttäytyminen poikkeaa yksittäisten materiaalien pintojen homehtumisesta. Kokeiden ja niiden numeeristen simulointien perusteella on voitu tehdä seuraavia päätelmiä eri materiaalien rajapintojen homehtumisesta:

- Homeen kasvunopeus ja alin homehtumiskosteus vastaa herkemmin homehtuvan materiaalin arvoa
- Homehtumisen maksimitaso määräytyy erikseen kummankin pohjamateriaalin mukaan
- Homeen pitkäaikainen taantuminen tapahtuu yleensä pohjamateriaalin mukaan.

Tärkeintä homeen numeerisessa mallintamisessa on sen kasvun oikean suuruusluokan ja nopeuden ennakointi. Laskennallinen homeen kasvu kuvaa tarkasteltavan materiaalin tai rakenteen homehtumisriskiä vallitsevissa oloissa. Tämän tutkimuksen tuloksena saaduilla mallin parannuksilla voidaan entistä luotettavammin simuloida homeen kasvua ja käyttää sitä erilaisten rakenteiden toimivuuden kriteerinä dynaamisissa olosuhteissa.

## Kiitokset

Rahoitus Tekesiltä, VTT:stä ja useilta rakennusalan yrityksiltä mahdollisti tämän 4-vuotisen tutkimushankkeen "Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja homeriskin laskennallinen arviointi (Homemalli)". Kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille henkilöille.

## Lähdeluettelo

- [1] Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report no 221. 40 p + app 9 p
- [2] Viitanen, H. & Bjurman, J. 1995. Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. *Mat. und Org.* 29(1): 27-46..
- [3] Hukka, A, and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology.* 33 (6) 475-485.
- [4] Viitanen, H., Hanhijärvi, A., Hukka, A. and Koskela, K. Modelling mould growth and decay damages In: Seppänen, O & Säteri, J(ed). *Healthy Buildings 2000*Vol.4. FiSIAQ, s. 341-346
- [5] Sedlbauer, K. 2001. Prediction of mould fungus formation on the surface of/and inside building components. University of Stuttgart, Fraunhofer Institute for Building Physics, Thesis. Stuttgart. Germany.
- [6] Sedlbauer K. & Krus, M. (2003). A new model for mould prediction and its application in practice. *Research in Building Physics.* Ed. by Carmeliet et al. 2nd Int. Conference on Building Physics.
- [7] Peuhkuri, Ruut; Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo. Modelling of mould growth in building envelopes. *Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing seminar, Copenhagen, 2008*
- [8] Ojanen, Tuomo; Viitanen, Hannu; Peuhkuri, Ruut. Modelling of mould growth in building envelopes. – existing models, discussion on improvement aspects, sensibility analysis. Annex 41 working meeting, Porto, Portugal, October 22–24, 2007
- [9] Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo. Improved model to predict mould growth in building materials. *Proceedings. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X. USA, 2 - 7 Dec. 2007.* ASHRAE, DOE, ORNL. Atlanta, USA (2007), 8 p.
- [10] Peuhkuri, R, Viitanen H., Ojanen T., Lähdesmäki K., Vinha J., *Rakennusmateriaalien homeenkestävyys ja sen mallintaminen pysyvissä kosteusrasitusoloissa. Rakennusfysiikka 2009.* Tampere 27. - 29.10.2009. 10 s.
- [11] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iitti, H. 2009. *Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143.* Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaistaan vuonna 2009.

## **8. Ääneneristys**



# Suurten asuintilojen ääneneristys

Heikki Helimäki ja Timo Huhtala  
Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy

## Tiivistelmä

Suurten asuintilojen ääneneristävyydessä on havaittu viime vuosina määräysten alituksia. Havaitut ongelmat ovat keskittyneet rivitaloissa vaakasuuntaiseen ilmaääneneristävyyteen ja kerrostaloissa pystysuuntaiseen askelääneneristävyyteen. Rakenteissa ei ole sinällään havaittu rakenteellisia vikoja (esim. äänivuotoja). Tutkimuksien perusteella ongelmat aiheutuvat sivutiesiirtymän aliarvioimisesta, mittaustavasta ja käytettyjen rakenteiden heikentyneestä ääneneristävyydestä. Rakennusteollisuus ry tulee julkaisemaan syksyn aikana suunnitteluohjeen, jossa esitetään asuinrakennusten rakennekokonaisuudet, joiden suunnittelussa havaitut ongelmat on otettu huomioon. Rakennustarkastusyhdistyksen johtokunta on antanut suosituksen  $60 \text{ m}^3$  tilavuusrajoituksen käyttämisestä kenttämittaustuloksia laskettaessa. Ympäristöministeriölle on ehdotettu, että kenttämittaustuloksien normalisoinnissa siirryttäisiin käyttämään 0,5 sekunnin jälkikäikunta-aikaa, toimenpidettä joka on tehty useissa maissa aikaisemmin.

## 1. Johdanto

Nykyiset ääneneristysmääräykset tulivat voimaan vuonna 2000 (RakMK C1-1998). Ilmaääneneristysluvun  $R'_w$  tulee olla asuntojen välillä vähintään 55 dB ja askeläänitasoluvun  $L'_{n,w}$  enintään 53 dB. Molemmat vaatimukset koskevat rakennuksessa mitattavia arvoja. Määräysten muuttumisen yhteydessä toteutettiin Rakennusteollisuus ry:n kanssa suuri tutkimusohjelma, jossa selvitettiin lähinnä miten uusi 5 dB tiukempi askelääneneristysvaatimus täytetään. Tutkimusten jälkeen julkaistiin ”Betonirakenteiden äänitekniset rakennekortit” [1], joiden mukaan asuinrakennukset pääosin rakennettiin useita vuosia. Vuonna 2007 alettiin kentällä saada mittaustuloksia, jotka eivät täyttäneet vaatimuksia, vaikka rakenteista ei löytynyt selvää rakenteellista puutetta. Rivitalojen alakertojen suurien tilojen ilmaääneneristävyydet eivät täytyneet ja kerrostaloissa oli ongelmia pystysuuntaisen askelääneneristyksen osalta suurissa tiloissa. Ongelmalliset isot tilat asuinrakennuksissa muodostuvat pääsääntöisesti olohuonekeittiö-yhdistelmistä, joiden pinta-alat ovat huomattavasti yli  $20 \text{ m}^2$ . Rakennusteollisuus ry perusti työryhmän selvittämään uudisrakennuksissa havaittuja puutteita, tarkoituksena oli selvittää puutteiden syyt ja selvittää korjaustapaa ja määrittää rakenteet, joilla vaatimukset täytetään. Projektin tuloksena julkaistaan suunnitteluohje betonirakenteisten asuinrakennusten suunnitteluun [2].

## 2. Mitä on muuttunut

Asuntojen sisäarkkitehtuuri on muuttunut siten, että asuntojen sisällä suuria yhtenäisiä avoimia tiloja. Tilat olivat pienempiä aikaisemmin. Rivitaloissa käytettiin aikaisemmin maanvaraisia betonilaattoja alapohjana, jolloin ne eivät jatkuneet yhtenäisinä asuntojen välillä. Molempien asuntojen erilliset seinät tukeutuivat erillisille betonilaatoille. Nykyään rakennetaan ääniteknisesti heikommille alustoille ja alapohjarakenteena on jatkuva betonilaatta.

Rakennusten ulkokuorissa on siirrytty betonisista sandwich-elementeistä sisäkuorielementteihin, joiden sisäkuoren paksuus on vaihdellut yleensä välillä 70-150 mm. Ulkopuolella käytetään lämmöneristeenä joko mineraalivillaa tai EPS:ää sekä ulkopinnassa rappausta tai tiilimuurausta [3].

Näiden toimenpiteiden seurauksena sivutiesiirtymän merkitys on kasvanut.

### 3. Tutkimukset

Tutkimuksissa hyödynnettiin akustisten konsulttitoimistojen ja VTT:n mittaustuloksia. Joissain kohteissa useat tahot tekivät toisistaan riippumattomia mittauksia. Mittaukset usein laajenivat siten, että koko taloyhtiö jouduttiin mittaamaan. Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat: Betonikeskus ry, NCC, Sato, VVO, YIT, Parma, Hartela ja Peab Seicon. Materiaalin kokosi Helimäki Akustikot ja ohjeeseen liittyvät detaljit ja rakenteet laati Insinööritoimisto Ylimäki Tinkanen Oy. Projektikokouksissa oli mukana myös VTT, Promethor Oy ja Työterveyslaitos.

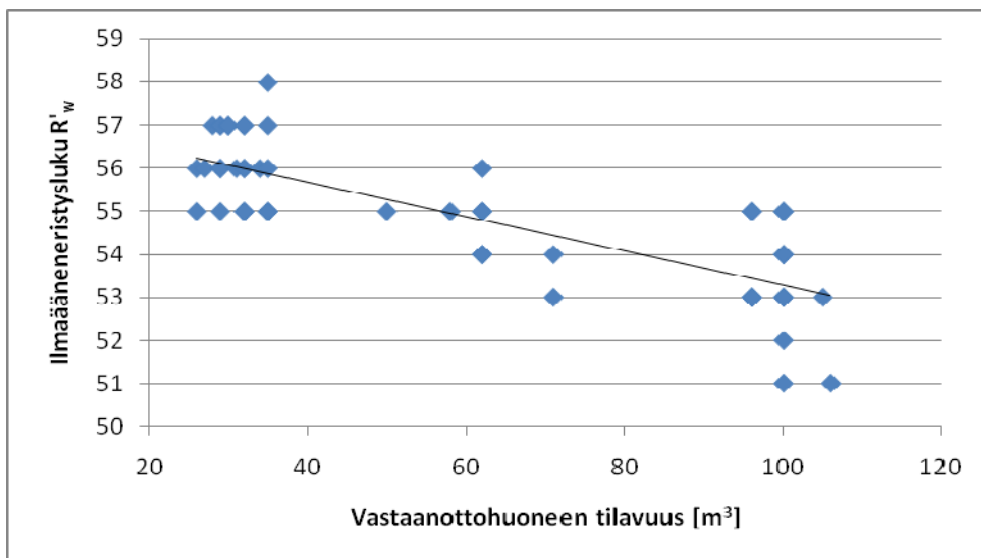
#### 3.1 Rivitalojen mittaukset

Rivitaloista kertyi satoja mittaustuloksia. Rivitaloissa ilmaääneneristysluvut olivat tyypillisesti 51-56 dB. Tutkimuksen aikana tehtiin useita vertailumittauksia eri toimenpiteistä muun muassa: irrotettiin kevyt ulkoseinä asuntojen välisestä seinästä, mitattiin ilmaääneneristävyyksiä sekä lautaparketin kanssa että ilman, asuntojen väliseen seinään kiinnittyvä asunnon sisäinen porras poistettiin ja mitattiin värähtelyjä eri pinnoista.

Rivitalojen rakenteet olivat tyypillisesti seuraavat:

- alapohjat ja välipohjat O27
- asuntojen välinen seinä 180-200 mm betonia
- ulkokuoret kevytrakenteisia

Vastaanotto-tilan tilavuuden ja mitatun ilmaääneneristysluvun välillä oli vahva korrelaatio.



Kuva 1. Ilmaääneneristysluku  $R'_w$  eräässä rivitalokohteessa tilavuuden funktiona (rakenteet pysyvät samoina, vain tilan koko vaihtuu)

Laskettaessa ilmasteneristävyttä  $R'$  terssikaistoilla [4,5,6], keskiäänitasojen erotus normalisoidaan käyttämällä erottavan rakenteen pinta-alan  $S$  suhdetta vastaanottohuoneen absorptioalaan  $A$ , tällöin ilmasteneristävyys taajuuskaistoittain määritetään kaavalla

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (1)$$

missä  $R'$  = ilmasteneristävyys terssikaistalla [dB]  
 $L_1$  = äänenpainetaso lähetyshuoneessa [dB]  
 $L_2$  = äänenpainetaso vastaanottohuoneessa [dB]  
 $S$  = tilojen välinen pinta-ala [m<sup>2</sup>]  
 $A$  = vastaanottotilan kokonaisabsorptio [m<sup>2</sup>-Sab]

Käytetty laskentatapa muuttaa siis mitattua äänitasoeroa termillä  $S/A$ .

Standardissa ISO 140-4 on myös mahdollisuus käyttää normalisointiin tilojen välisen rakenteen pinta-alan ja tilavuuden sijasta myös jälkikaiunta-aikaa. Tällöin mittaustulos normalisoidaan vertaamalla mitattua jälkikaiunta-aikaa suoraan vertailujälkikaiunta-aikaan  $T_0$ . Näin määritetty mittaustulos on standardoitu äänitasoero  $D_{nT}$  ja se määritetään kaavalla

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

missä  $T_0$  = jälkikaiunta-ajan vertailuarvo 0,5 [s].

Vastaavasti askeläänitaso voidaan normeerata joko vastaanottotilan absorptioalaan tai jälkikaiunta-aikaan [7,8,9].

### 3.2 Kerrostalojen askeläänitasolukumittaukset

Suurissa keittiö-olohuoneyhdistelmissä mitattiin askeläänitasolukuja  $L'_{n,w}$  54-56 dB. Välipohja rakenteena oli O37 + Tuplex + lautaparketti. Rakenteen paino on yli 500 kg/m<sup>2</sup>.

Massiivibetonivälipohjilla 300 mm betoni (paino yli 700 kg/m<sup>2</sup>) + Tuplex + lautaparketti vastaavia alituksia ei havaittu.

### 3.3 Mallinnukset

Tiloja mallinnettiin standardin EN 12354 [10,11] mukaisesti käyttäen Bastian ohjelmistoa. Mallinnuksella selvitettiin seuraavia seikkoja:

- miten mallinnus vastaa mittauksia
- miten parantaa ääneneristävyttä kohteissa, joissa ei täytetä määräyksiä
- millaisilla rakenteilla täytettäisiin määräysten taso

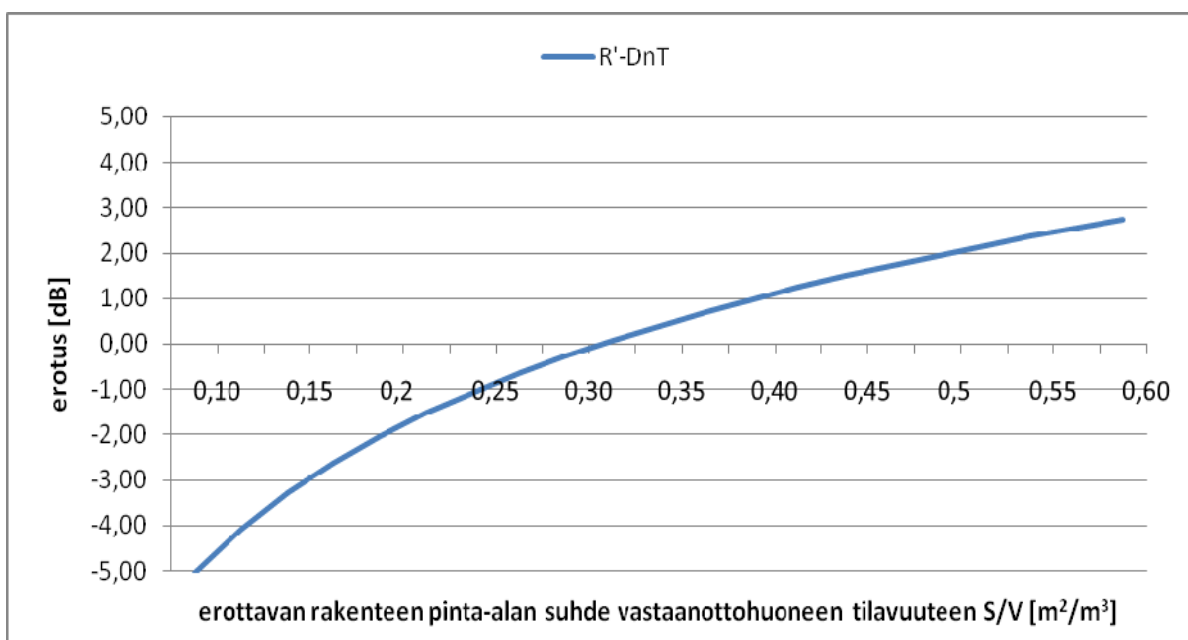
### 3.4 Vertailut muiden maiden määräyksiin

Tutkimuksissa selvisi, että ongelma koski ainoastaan suuria tiloja. Vertailun vuoksi selvitettiin millaiset määräykset ovat voimassa muissa maissa ja miten suurten tilojen osalta on muualla toimittu [12,13,14]. Kansainväliset standardit, joiden mukaan mittaukset tehdään mahdollistavat

eri tapoja laskea lopullinen lukuarvo, jota määräyksissä käytetään. Kansallisesti on sovittu mitä lukuarvoa eri maissa käytetään. VTT teki myös sähköpostikyselyn eri maihin määräyksistä [15] ja niissä tapahtuneista muutoksista ja niiden syistä.

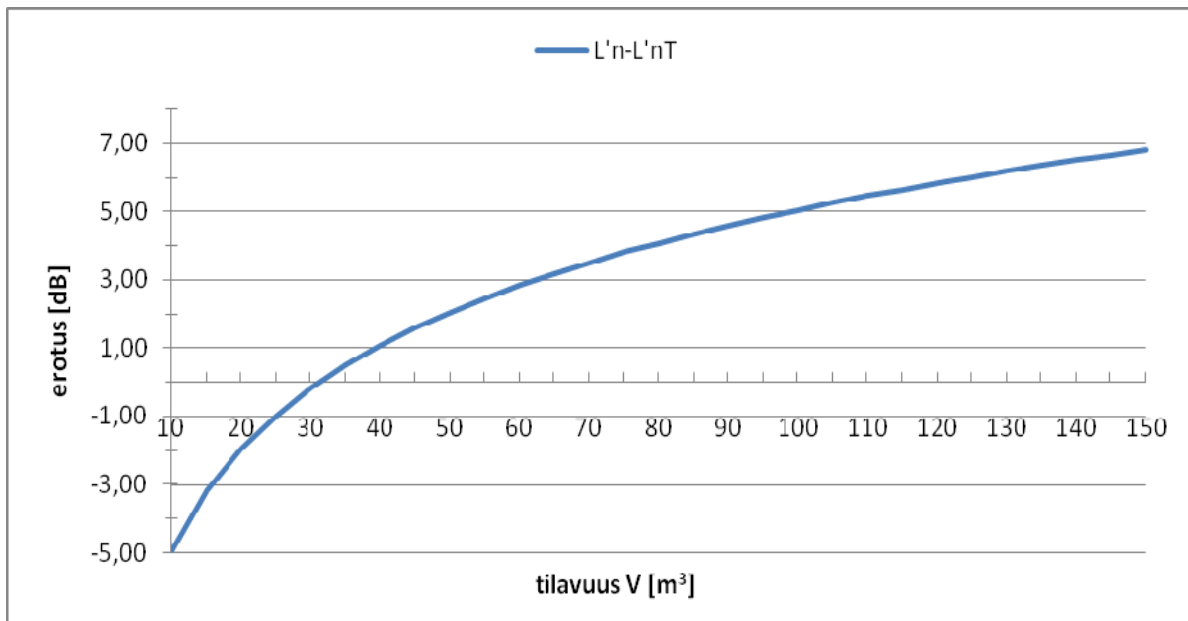
Useissa Euroopan maissa on viime aikoina siirrytty käyttämään jälkikaiunta-aikaan normalisoituja mittasuureita  $D_{nT,w}$  sekä  $L'_{nT,w}$ . Tutkimusten mukaan saatavat tulokset korreloivat paremmin kuulohavaintoon [16,17]. Maissa, joissa on käytössä Suomen tapaan normalisoidut mittaluvut, on osittain siirrytty käyttämään tilavuusrajoitusta tulosten laskennassa. Tilavuusrajoitus muuttaa mittaustulokset isojen tilojen osalta käytännössä lähemmäs jälkikaiunta-aikaan normalisoituja tuloksia.

Kuvassa 2 on kuvattu nykyisin käytössä olevan ilmaääneneristysluvun  $R'$  ja standardoidun äänitasoeron  $D_{nT}$  erotusta. Kuvassa 3 on normalisoidun askeläänitason  $L'_n$  ja standardoidun askeläänitason  $L'_{nT}$  erotus tilavuuden funktiona.



Kuva 2. Ilmaääneneristävyyden  $R'$  ja standardoidun äänitasoeron  $D_{nT}$  erotus.





Kuva 3. Normalisoidun askeläänitason  $L'_n$  ja standardoidun askeläänitason  $L'_{nT}$  erotus tilavuuden funktiona.

### 3.5 Kerrostalojen ilmajääneristyslukumittaukset

Alkuperäisten kerrostalomittausten jälkeen haluttiin varmistaa mallintamalla saadut tulokset kerrostaloasunnoista. Päätulokset olivat

- kun tiloissa on paljon betonisia rakenteita, sivutiesiirtymän osuus kasvaa ja ääneneristävyyttä heikkenee
- mittausuunnalla ei ollut väliä. Mittaus pienestä tilasta suureen antoi saman tuloksen kuin mittaus suuresta tilasta pieneen.
- kerrostaloissa löytyi vaakasuuntainen ilmajääneristysongelma, jonka mallinnus ennusti, mutta jota ei koskaan ollut havaittu mittauksissa aikaisemmin

### 3.6 Kerrostalojen askeläänitasolukumittaukset

Eräissä aiemmissa mittauksissa oli saatu viitteitä että joko lautaparketin ja laminaatin tai eräiden alusmateriaalien välillä on eroja, jotka eivät näy valmistajien ilmoittamissa laboratoriomittausarvoissa. Lattiamateriaalien ominaisuuksien selvittämiseksi tehtiin laaja mittausohjelma, jossa mitattiin eri materiaaleja siten, että joka materiaalista oli kolme mittaus tulosta eri tiloissa. Mittaukset tehtiin valmistumassa olevassa kerrostalossa hieman ennen kohteen valmistumista. Päätulokset olivat

- laminaatti antoi 3 dB hiljaisempia askeläänitasoja kuin lautaparketti kun alusmateriaalina oli Tuplex (laboratoriomittausten perusteella vastaavaa eroa ei olisi pitänyt olla)
- laminaatti antoi myös muilla hyvin joustavilla alusmateriaaleilla parempia tuloksia kuin lautaparketti
- laminaatin alle löytyi ääniteknisesti parempi materiaali kuin Tuplex
- muovimatto TX162 antoi selkeästi paremman tuloksen kuin laminaatti + Tuplex
- mittauksissa saatiin paljon suurempi eroja kuin valmistajien ilmoittamien arvojen perusteella oletettiin

- lattioiden askeläänitasolukuja laskettiin eri laskentamalleilla lähtien taajuuskaistaisista laboratoriomittauksista mutta saatujen tulosten korrelaatio kentällä mitattuihin arvoihin ei ollut kovin hyvä [18,19,20]

#### 4. Mitä löytyi

Mittausraporteissa ei kerrota rakenteita riittävällä tarkkuudella. Tutkimukset osoittivat, että lopulliset ilma- ja askelääneneristykset riippuvat sekä tilojen välisestä rakenteesta että sivuavista rakenteista. Mittausraportit kertovat tavallisesti tilojen välisen rakenteen, mutta eivät sivuavia rakenteita. Tästä syystä sivutiesiirtymän osuutta on mahdoton selvittää mittausraporttien perusteella.

Nykyinen mittaustapa vaatii määrittämään vastaanottohuoneen tilavuuden, jonka laskeminen on joskus hankalaa [21]. Suurissa tiloissa, jotka muodostuvat esim. olohuoneesta, keittiöstä, eteisestä ja porrasaukosta tilan rajaaminen johtaa helposti siihen, että eri mittaajat laskevat tilavuuden eri tavalla. Joissain tilanteissa yhden kuution muutos tilavuudessa muuttaa lopputulosta yhden desibelin.

Ilmaääneneristävyyden mallintaminen vaikuttaa luotettavalta, vaikka EN 12354 huomioi vain ensimmäisen kertaluvun eli yhden liitoksen yli tapahtuvan sivutiesiirtymän. Rivitalomittauksissa ääntä vastaanottohuoneeseen saattaa säteillä myös tiloja erottavaa seinää vastakkainen seinä, jota malli ei siis huomioi.

Askeläänitasoluvun osalta sekä laskentamallit että valmistajien ilmoittamat lukuarvot antavat huomattavan erilaisia arvoja kuin mittauksissa saatiin.

Käytössä olevat rakenteet eivät kaikilta osin ole riittävän hyviä, jotta ääneneristysvaatimusten taso täytettäisiin. Rakenteita joudutaan muuttamaan sekä rivitalo- että kerrostalo asunnoissa

#### 5. Määräykset

Mittaukselliset tulokset korreloisivat paremmin ihmisten havaintojen kanssa, jos tulokset normalisoitaisiin 0,5 sekunnin jälkikaiunta-aikaan. Lisäksi poistuisi tulkinnanvaraisuus tilavuuden laskennassa. Ympäristöministeriölle on ehdotettu siirtymistä 0,5 sekuntiin normalisoituihin ääneneristysarvoihin sekä ilma- että askelääneneristävyyden määrittämisen osalta. Lisäksi ehdotettiin, että askelääneneristyksen mittaaminen aloitettaisiin 50 Hz:stä. Ministeriö on jäänyt odottavalle kannalle, mitä lukuarvoja Euroopan tasolla siirryttäisiin käyttämään (vaihtoehtoja on toistakymmentä).

Rakennustarkastusyhdistyksen johtokunta on antanut suosituksen 60 m<sup>3</sup> tilavuusrajoituksen käytöstä mittaustulosten laskennan yhteydessä.

#### 6. Yhteenveto

Rakenteiden valinnassa tulee huomioida sivutiesiirtymän osuus tarkemmin kuin aikaisemmin on tehty. Asuinrakennusten rakenteita joudutaan muuttamaan. Määräyksissä pyritään siirtymään standardoitujen lukuarvojen käyttöön, jolloin normalisointi tehdään käyttäen 0,5 sekunnin vertailuarvoa. Mittauksissa käytetään 60 m<sup>3</sup> tilavuusrajoitusta, joka on rakennustarkastusyhdistyksen johtokunnan suositus.

## Lähdeluettelo

- [1] Betonirakenteiden äänitekniikka. 2000. Rakennusteollisuus RTT Ry. 79 s
- [2] Asuinrakennusten äänitekniikkaa täydentävä suunnitteluohje. 2009. Rakennusteollisuus RTT Ry. 84 s + liitteet
- [3] Rauhala J 2009, TTY, Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ilmaääneneristävyyys. 107-101 s.
- [4] ISO 140-3. 1995. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Geneve: International Organization for Standardization. 20 s.
- [5] ISO 140-4. 1998. Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneve: International Organization for Standardization. 24 s.
- [6] ISO 717-1. 1996. Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation. Geneve: International Organization for Standardization. 15 s.
- [7] ISO 140-6. 1998. Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors. Geneve: International Organization for Standardization. 15 s.
- [8] ISO 140-7. 1998. Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors. Geneve: International Organization for Standardization. 17 s.
- [9] ISO 717-2. 1996. Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation. Geneve: International Organization for Standardization. 12 s.
- [10] EN 12354-1. 2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements. Airborne sound insulation between rooms. Bryssel: European Committee for Standardization. 66 s.
- [11] EN 12354-2. 2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements. Impact sound insulation between rooms. Bryssel: European Committee for Standardization. 36 s.
- [12] Rasmussen B and J.H. Rindel. Concepts for evaluation of sound insulation of dwellings from chaos to concensus? Forum Acusticum 2005. Paper 7820.
- [13] Rasmussen B. Sound insulation between dwellings-Classification schemes and building regulation in Europe. Proceelings Inter-noise 2004, Prague 2004, paper 778.
- [14] Rasmussen B. Sound insulation of residential housing: Building codes and classification schemes in Europe. Handbook of Noise and Vibration Control. chapter 114. John Wiley & Sons. 2007.
- [15] Apilo L., Nykänen H. ja Sipari P. 2008. Lausunto koskien rakennuksen ääneneristävyyttä ja sen mittausta ja tulkintaa. VTT tutkimuslaskelma nro VTT-S-03879-08. 4+17 s.
- [16] Gerretsen E. Classification of acoustical quality of dwellings – backgrounds of a renewed Dutch standard. Proceedings inter-noise 2001. Hague 2001.
- [17] Schönback W. Lang J. and Pierrard R. Sound insulation in housing construction. Vienna, July 2006.

- [18] ISO 140-8. 1997. Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor. Geneve: International Organization for Standardization. 14 s.
- [19] Ympäristöopas 99. 2003. Ääneneristys rakennuksessa. Helsinki: Ympäristöministeriö. 48 s.
- [20] Kylliäinen, M. Uncertainty of impact sound insulation measurements in field, TTY 2003, raport 125. 113 s.
- [21] ISO 140-14. 2004. Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 14: Guidelines for special situations in the field. Geneve: International Organization for Standardization. 31 s.
- [22] Kylliäinen, M. Hongisto, V. RIL 243-1-2007. Rakennusten akustinen suunnittelu – Akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 224 s.

# Rakennusosien ilmajääneristävyyksien mallintaminen rakentamisessa ja tuotekehityksessä

Mikko Kylliäinen ja Antti Mikkilä  
Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy

## Tiivistelmä

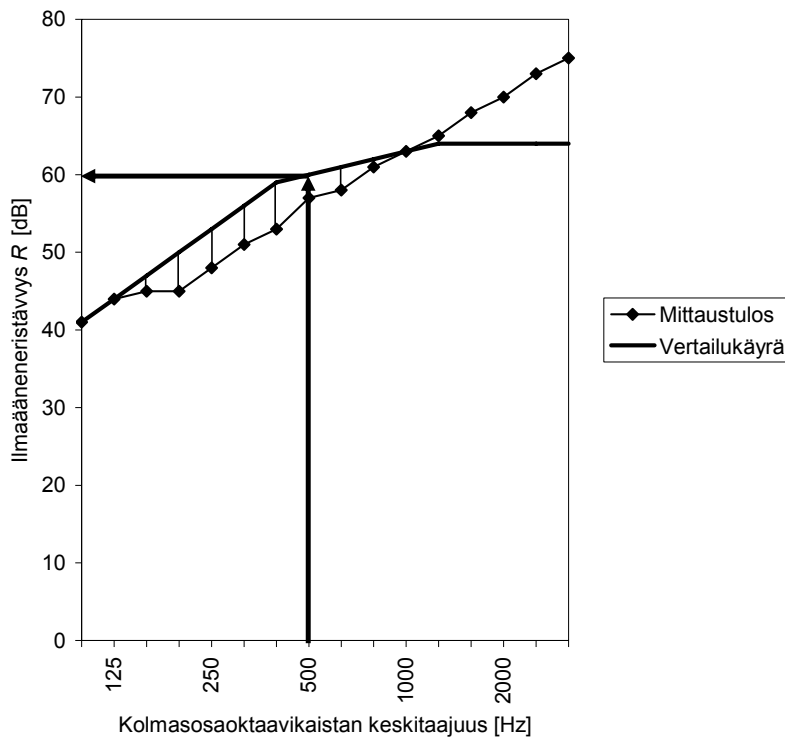
Rakennusosien ilmajääneristävyydet ja ilmajääneristysluvat on perinteisesti määritetty mittaamalla laboratoriossa. Laboratoriomittauksen käyttökelpoisuutta rakennushankkeiden aikana ja tuotekehitystyössä rajoittaa kuitenkin moni seikka. Laboratoriomittaus yksittäisen rakennetyypin ominaisuuksien selvittämiseksi ei ole kustannuksiltaan kovin edullinen toimenpide. Mittauksen tilaajan on myös varattava aikaa tutkittavan rakennusosan rakentamiseksi, kuljettamiseksi sekä asentamiseksi laboratorioon, jossa mittauksen tekemiseen voi olla pitkä jonotusaika. Vaihtoehto ilmajääneristyslukujen mittauksille on rakenteiden laskennallinen tarkastelu. Tieto rakenteiden ilmajääneristävyyteen liittyvistä tekijöistä on viime vuosikymmeninä lisääntynyt runsaasti. Rakenteiden ilmajääneristävyydet ja ilmajääneristysluvat voidaan nykyisin määrittää laskennallisesti riittävän luotettavasti. Nykyaikaisilla laskentamenetelmillä voidaan esimerkiksi selvittää uudentyypisten rakennetyyppien ääneneristysominaisuuksia rakennuslupahakemusta varten, tutkia erilaisten materiaali- ja rakenneparametrien vaikutusta tuotekehityshankkeissa ja sulkea pois vaihtoehdot, joilla ei saavuteta tavoiteltavaa hyötyä. Laskennallisesti voidaan tarkastella myös erilaisten rakennusvirheiden, kuten rakojen vaikutuksia rakennusosien ääneneristyskykyyn.

## 1. Johdanto

Ilmajääneristyksen tarkoituksena on vähentää puheen, musiikin, soitinten, äänentoiston tai rakennuksen teknisten järjestelmien huonetilaan synnyttämän ilmajään siirtymistä toiseen huonetilaan tai rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen, kuten tie- tai raideliikenteen aiheuttaman melun siirtymistä ulkoa sisään. Ilmajääneristävyys  $R$  [dB] on suure, joka kuvaa rakenteen kykyä eristää pinnalleen kohdistuvan äänienergian siirtymistä toiselle puolelle. Kuten akustiikan suureet yleensäkin, ilmajääneristävyys riippuu taajuudesta. Tavallisesti rakenteiden ääneneristyskyky on sitä parempi, mitä suurempi taajuus on. Samoin rakenne eristää ääntä sitä enemmän, mitä suurempi sen massa on. Näistä peruseräiteistä on kuitenkin lukuisia poikkeuksia: esimerkiksi rakenteen jäykkyydestä seuraa rajataajuus, jolla rakenteen käyttäytyminen muuttuu ja ilmajääneristävyys heikkenee. Lisäksi yhdestä massakerroksesta koostuva rakenne, kuten betonilaatta, toimii eri tavalla kuin kahdesta massakerroksesta ja niiden välissä olevasta ilmakerroksesta muodostuva rakenne.

Ainoa tarkka tapa ilmoittaa rakenteen kyky eristää ilmajääntä olisi käyrä, joka ilmoittaa ilmajääneristävyyden taajuuden funktiona. Käytännön suunnittelutyössä tai ilmoitettaessa vaatimuksia rakentamismääräyksissä tämä olisi kuitenkin hankalaa, joten on kehitetty menetelmä, jonka avulla eri taajuuksilla määritetyistä ilmajääneristävyyksistä saadaan määritetyksi yksi mittaluku eli ilmajääneristysluku  $R_w$  [dB]. Ilmajääneristysluvun määrittely perustuu siihen, että rakenteen ilmajääneristävyyden lisäksi taajuudesta riippuu myös erilaisten äänilähteiden, kuten ihmisen puheen, äänenkehitys ja ihmisen kuulon herkkyyys. Tutkittaessa rakenteen ääneneristyskykyä puhetta vastaan kiinnostava taajuusalue on tällöin 100...3150 Hz.

Mittauksin ja haastatteluin on aikanaan määritetty taajuuden suhteen ilmaääneneristävyydet, jotka ihmiset yleisesti kokevat hyviksi. Nämä eristävyydet on otettu standardiin ns. vertailukäyräksi. Ilmaääneneristysluku  $R_w$  saadaan määritetyksi vertailukäyrän avulla niin, että samaan koordinaatistoon sijoitetaan sekä vertailukäyrä että taajuuksittain mitatut ilmaääneneristävyydet  $R$ . Vertailukäyrää siirretään sen muotoa muuttamatta koordinaatistossa 1 dB askelin korkeussuunnassa sellaiseen asemaan, että taajuuskaistaisten ilmaääneneristävyyksien poikkeamat vertailukäyrän huonommalle puolelle eli alas ovat yhteensä enintään 32 dB [1]. Kun vertailukäyrä on tällaisessa asemassa, ilmaääneneristysluku  $R_w$  luetaan vertailukäyrältä 500 Hz kohdalta (kuva 1).



Kuva 1. Taajuuskaistoittain määritetyistä ilmaääneneristävyyksistä saadaan lasketuksi ilmaääneneristysluku vertailukäyrän avulla. 180 mm paksun betoniseinän ilmaääneneristysluku  $R_w$  on vertailukäyrältä 500 Hz taajuuden kohdalta luettuna 60 dB.

Ilmaääneneristysluku  $R_w$  ei sovellu erityisen hyvin rakenteen ääneneristyskyvyn mittariksi, jos äänilähteen taajuusjakauma poikkeaa puheäänistä. Niinpä määritettäessä rakenteen ilmaääneneristyskykyä tieliikenne- tai raideliikennemelua varten on ilmaääneneristyslukuun tehtävä korjaus. Standardissa ISO 717-1 [1] on määritelty spektripainotustermit, jotka ottavat huomioon tieliikennemelun ja raideliikennemelun taajuusjakaumat. Tieliikennemelua varten käytetään spektripainotustermiä  $C_{tr}$  ja raideliikennemelua vastaan termiä  $C$ . Ilmaääneneristysluvut tieliikenne- tai raideliikennemelua vastaan ilmoitetaan ilmaääneneristysluvun ja spektripainotustermin summina:  $R_w + C_{tr}$  ja  $R_w + C$ .

Rakennusosien ilmaääneneristävyydet  $R$  ja ilmaääneneristysluvut  $R_w$  on perinteisesti määritetty mittaamalla laboratoriossa. Mittausten perusteella rakennusalan järjestöt ja rakennusteollisuus ovat laatineet käsikirjoja, suosituksia ja ohjeita, joissa esitetään vakioratkaisuja ääneneristyksen toteuttamiseksi. Esimerkiksi BES-järjestelmää laadittaessa ja kehitettäessä vakioitiin paitsi rakenteiden liitokset, myös asuinkerrostalon ääneneristysratkaisut [2–5]. Uusien lämmöneristysmääräysten täyttämiseksi aiemmin vakioidut ratkaisut eivät aina ole riittäviä.

Lisäksi betonisandwich-elementin rinnalle on muista syistä tullut uusia julkisivuvaihtoehtoja. Näiden uusien rakenteiden ääneneristysominaisuudet on tunnettava esimerkiksi rakennettaessa asuinkerrostalo liikennemelualueelle, jossa rakennuspaikan asemakaavassa on rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys [6]. Kirjallisuudessa erilaisten rakennetyyppien ilmääneneristyslukuja on esitetty rajallisesti [7], eikä uusien rakennetyyppien eristävyyksistä ole olemassa kootusti tietoa eikä välttämättä tietoa ylipäättäänkään. Korjausrakentamisessa esiintyy lisäksi vanhoja rakennetyyppejä, jotka ovat jääneet käytöstä pois ennen kuin rakennusakustiset mittaukset alkoivat yleistyä.

Erilaisissa rakennushankkeissa esiintyvien rakennetyypivaihtoehtojen määrä on niin suuri, että on varsin epätodennäköistä, että kaikkien ääneneristysominaisuuksista voitaisiin saada mittaustuloksia. Laboratoriomittausten käyttökelpoisuutta rakennushankkeiden aikana ja tuotekehitystyössä rajoittaa muutenkin moni seikka. Laboratoriomittaus yksittäisen rakennetyypin ominaisuuksien selvittämiseksi ei ole kustannuksiltaan kovin edullinen toimenpide. Olisi esimerkiksi kohtuutonta vaatia, että omakotitalon rakentaja vie suunnitteilla olevan talonsa uudenlaisen ulkoseinärakenteen laboratorioon testattavaksi saadakseen rakennusluvan. Laboratoriomittaus vaatii myös aikaa: mittauksen tilaajan on varattava aikaa tutkittavan rakennusosan rakentamiseksi, kuljettamiseksi sekä asentamiseksi laboratorioon, jossa mittauksen tekemiseen voi lisäksi olla pitkä jonotusaika. Rakennushankkeiden aikataulujen lyhentyessä laboratoriomittausten tekemiseen ei useinkaan ole ajallisia mahdollisuuksia.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan rakennusten ääneneristystä suunniteltaessa vaatimusten täyttyminen voidaan osoittaa paitsi laboratorio- ja kenttämittauksin tai käyttäen aikaisemmin hyväksytyjä rakenneratkaisuja, myös laskentamenetelmin [8]. Tieto rakenteiden ilmääneneristävyysliittyvistä tekijöistä on viime vuosikymmeninä lisääntynyt runsaasti, ja nykyisin rakenteiden ilmääneneristävyysliittyvät ja ilmääneneristysluvat voidaan määrittää laskennallisesti riittävän luotettavasti. Käytännössä laskenta kuitenkin edellyttää laskentamallien ohjelmoimista tietokoneohjelmaksi. Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy on vuosina 2006–2009 kehittänyt excel-pohjaisen ilmääneneristävyysliittyvien laskentaohjelman ILPO (ilmääneneristävyysliittyvien prognoosiohjelma), joka perustuu uusimpaan tietoon rakenteiden ilmääneneristävyysliittyvistä. Artikkelin tarkoituksena on osoittaa esimerkkien avulla, millaisia etuja ilmääneneristävyysliittyvien ja ilmääneneristyslukujen määrittämisestä laskennallisesti on uusien rakenteiden tuotekehityksessä ja käytännön rakennushankkeissa.

## 2. Miksi oma laskentaohjelma?

Rakenteiden ääneneristävyysliittyvää koskevan teoreettisen tietämyksen lisääntymisestä huolimatta ilmääneneristävyysliittyvien laskenta on edelleen vaativaa asiantuntijatyötä, joka edellyttää tarkkaa tietämystä materiaalien akustisista ominaisuuksista, laskentamalleista, niiden mahdollisuuksista ja rajoituksista laskentatulosten luotettavuuden arvioimiseksi.

Markkinoilla on kaupallisia tietokoneohjelmia, jotka on tarkoitettu ilmääneneristävyysliittyvien laskentaan. Kaupallisten laskentaohjelmistojen ongelmana on kuitenkin se, että yleensä niiden taustalla olevia teoreettisia laskentamalleja ei ole ohjelmien käyttöohjeissa kuvattu riittävän tarkasti, jolloin ei ole mahdollista arvioida laskentatulosten luotettavuutta. Lisäksi eri laskentamallien tuottamat tulokset poikkeavat toisistaan huomattavastikin, mikä on todettu useissa tutkimuksissa [esim. 9]. Jopa suhteellisen yksinkertaisen perusrakenteen, peltirankarunkoisen molemmin puolin rakennuslevyllä levytetyn väliseinän taajuuskaistaiset

ilmaääneneristävyydet ja ilmaääneneristysluvut poikkeavat eri laskentaohjelmilla määritettyinä toisistaan ja mittaustuloksista jopa 20 dB.

Oman laskentaohjelman käytössä on se etu, että sen pohjalla olevat teoriat tunnetaan tarkkaan, samoin ohjelman mahdollisuudet ja rajoitukset ovat tiedossa. Samoin teorioiden tarkentuessa ja uusien rakennusmateriaalien tai rakennuslevyjen tullessa markkinoille on edullista, että uudet laskentamallit ja materiaalitiedot saadaan lisätyksi ohjelmaan ja sen tietokantoihin nopeasti. Käytettäessä kaupallisia ohjelmistoja tämä ei tavallisesti ole mahdollista, vaan ohjelmien käyttäjien on tyydyttävä niihin materiaaleihin ja laskentamalleihin, jotka ohjelman laatijat ovat katsoneet tarpeellisiksi ohjelmiinsa sisällyttää.

### 3. Ohjelman ominaisuudet

#### 3.1 Teoreettinen tausta

Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n kehittämä ilmaääneneristävyyksien  $R$  ja ilmaääneneristyslukujen  $R_w$  mallinnusohjelma ottaa huomioon rakenteen rakennekerrosten materiaaliominaisuudet ja paksuudet, rakennekerrosten välissä olevien ilmavälien paksuudet, tyhjän ja absorptiomateriaalilla täytetyn ilmavälin ominaisuudet sekä rakennekerrosten väliset kytkennät (jäykkä ranka, joustava ranka, kytkemätön kaksinkertainen rakenne). Ohjelman taustalla olevat laskentamallit on esitetty pääosin lähteissä [10–14]. Yksinkertaistetussa muodossa tärkeimmät rakenteiden ilmaääneneristävyyteen liittyvät laskentamenetelmät on esitetty myös lähteessä [15].

Ohjelmaan sisältyy kolme tietokantaa, joista yhteen on koottu laskennassa tarvittavat rakennusmateriaalien (esim. betoni, savitiili, ikkunalasi) ja rakennuslevyjen (esim. kipsilevy, vaneri, sementtikuitulevy) ominaisuudet, kuten tiheys, kimmomoduuli, sisäinen häviökerroin ja Poisson'n vakio. Toisessa tietokannassa on erilaisten eristeiden ominaisuuksia (tiheys, dynaaminen jäykkyys, vaimennussuhde) ja kolmannessa erilaisten rankojen ominaisuuksia (mm. rankakohtaisesti dynaamiset jäykkyydet ja paksuudet).

Laskentaohjelma toimii siten, että ohjelmalle syötetään vuorotellen ”kerros” ja ”liitos”. Kerrokset ovat aina rakennuslevyjä tai jostakin rakennusmateriaalista muodostuvia rakennekerroksia. Kerros voi olla mikä tahansa materiaali, jonka ominaisuudet riittävällä tarkkuudella tunnetaan. Liitosten avulla määritellään, miten vierekkäiset kerrokset liittyvät toisiinsa (kuvat 2 ja 3). Liitoksia ovat seuraavat vaihtoehdot:

- päällekkäisten kerrosten välinen ruuviliitos
- päällekkäisten kerrosten välinen liimaliitos
- kahden toisiinsa kytkemättömän kerroksen välissä oleva ilmaväli, joka voi olla tyhjä, kokonaan tai osittain ääntä absorboivalla eristeellä täytetty
- kahden toisiinsa kytketyn kerroksen liitos rangoilla. Ranka voi olla jäykkä (puurunko tai teräsputkipalkki) tai joustava (erilaiset peltirangat) ja ilmaväli voi olla tyhjä, kokonaan tai osittain absorboivalla eristeellä täytetty
- kahden jäykällä eristeellä toisiinsa kytkettyjen kerrosten väli (esimerkiksi eristerapattujen ulkoseinien eristekerros)

Kerroksia ja liitoksia voi laskennassa olla lähes rajaton määrä. Ohjelma poimii niiden ominaisuudet tietokannoista. Siten esimerkiksi kerrosta määriteltäessä riittää pelkästään



materiaalin tai rakennuslevyn sekä kerroksen paksuuden valinta. Kun kaikki rakenteen kerrokset ja liitokset on syötetty, määritellään vielä laskentajärjestys. Rakenteelle voidaan vielä määritellä joitakin lisäominaisuuksia, kuten ilmaääneneristävyyttä heikentävä rako. Ohjelmalla voidaan laskea myös, paljonko kaksirunkoisen seinärakenteen puoliskojen kytkeminen reunoilla yhteisellä kiskolla tai ala- ja yläjuoksupuulla vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen.

Laskentaohjelmalla määritetään rakenteen ilmaääneneristävyydet  $R$  taajuuskaistoittain. Näistä arvoista lasketaan standardin ISO 717-1 [1] mukaisesti yksilukuiset arvot eli ilmaääneneristysluku  $R_w$ , ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan  $R_w + C_{tr}$  ja ilmaääneneristysluku lento- tai raideliikennemelua vastaan  $R_w + C$ . Näitä arvoja tarvitaan mitoitettaessa rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä melualueille rakennettaessa.

**Lisää ranka ja kerros**

Ranka  
 AWS12 AWS-ranka

paksuus [mm]

k-jako [mm]

Ilmavälissä absorptiomateriaalia

absorptio

täyttöaste [0...1]

Täyttöaste = absorptiomateriaalin osuus ilmavälistä

Kerros  
 GN13 Kipsilevy GN13

paksuus [mm]

lkm [kpl]

Kuva 2. Esimerkki liitoksen ja kerroksen lisäämisestä ilmaääneneristävyyden laskentaohjelmassa ILPO: tietokannasta on valittu joustava peltiranka, jonka paksuus on 125 mm ja k-jako 600 mm. Rankojen välissä on 125 mm mineraalivillaa ja rankojen toiselle puolelle kiinnitetään kaksinkertainen kipsilevytys.

**Lisää ilmaväli**

Ilmaväli  
 paksuus [mm]

Ilmavälissä absorptiomateriaalia

absorptio

täyttöaste [0...1]

Täyttöaste = absorptiomateriaalin osuus ilmavälistä

Kerros  
 SXR Puukipsilevy SXR

paksuus [mm]

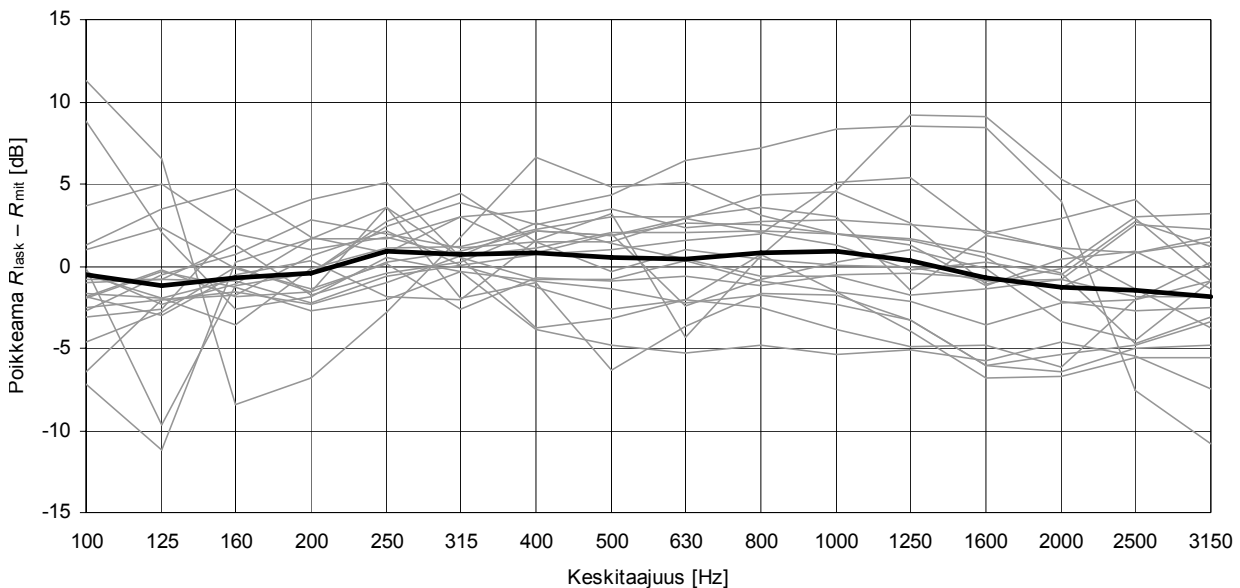
lkm [kpl]

Kuva 3. Esimerkki kahden toisiinsa kytkemättömän kerroksen liitoksen määrittelystä: laskentaa varten voidaan syöttää mikä tahansa ilmavälän paksuus ja määritellä, kuinka paljon mineraalivillaa kerrosten välisessä ilmatilassa on.

### 3.2 Laskentatarkkuus

Aiemmin on viitattu kaupallisten laskentaohjelmistojen tuottamien tulosten eroavaisuuksiin. Ilmaääneneristävyyksien ja ilmaääneneristyslukujen mallinnuksessa oleellista onkin se, että mallinnuksen tulokset ovat riittävän luotettavia. ILPO-laskentaohjelman luotettavuutta on tutkittu vertaamalla sekä taajuuskaistoin laskettuja ilmaääneneristävyyksiä  $R$  että ilmaääneneristävyyksiä  $R_w$  vastaavien rakenteiden mittaustuloksiin, joita on kerätty Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n mittaustietokantaan [16] kirjallisuudesta. Vertailut on tehty rakenteilla, joiden kaikki materiaali- ja rakenneominaisuudet on kirjallisuudessa esitetty riittävällä tarkkuudella.

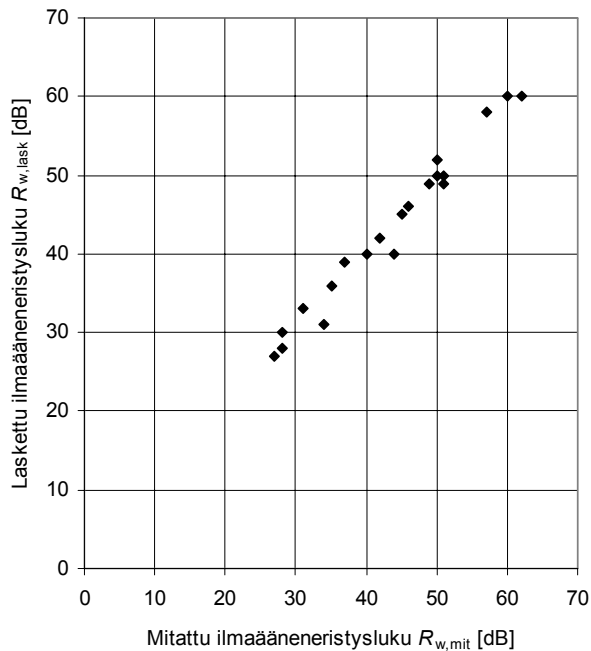
Kuvassa 4 on esitetty 20 erilaisen rakenteen taajuuskaistoittain laskettujen ilmaääneneristävyyksien  $R_{lask}$  poikkeama mitatuista ilmaääneneristävyyksistä  $R_{mit}$ . Laskettuihin rakennetyyppeihin sisältyy monoliittisia kivirakenteita, erilaisia rakennuslevyjä, sandwich-rakenteita ja rankarunkoisia levyseiniä. Poikkeama on aina rakennekohtainen ja riippuu myös laboratoriomittauksen mittauserävarmuudesta. Kuvasta 5 kuitenkin nähdään, että lasketut ja mitatut ilmaääneneristävyydet poikkeavat toisistaan keskimäärin yleensä enintään  $\pm 1$  dB. Yksittäisillä rakenteilla poikkeamat ovat yleensä alle  $\pm 5$  dB, mutta suurempia poikkeamia esiintyy lähinnä hyvin pienillä taajuuksilla ja suurilla taajuuksilla. Tämä johtuu siitä, että laboratoriomittaukseen ei edusta ehdotonta totuutta: kaikkeen mittaamiseen sisältyy epävarmuutta: tilastollinen arvio todellisesta ilmaääneneristävyydestä saataisiin vain toistamalla mittaus lukuisia kertoja. Laskenta- ja mittaustulosten suuret poikkeamat pienillä taajuuksilla johtuvat erityisesti siitä, että mittausten epävarmuustekijät pienillä taajuuksilla kasvavat [17–20]. Suurilla taajuuksilla erot johtuvat puolestaan siitä, että laboratorion rakenteiden ääneneristyskyky on rajallinen eikä niissä voida mitata luotettavasti rakenteita, joiden ilmaääneneristävyys on lähellä laboratorion eristävyttä [18].



Kuva 4. Lasketun ilmaääneneristävyyden ja mitatun ilmaääneneristävyyden poikkeamat 20 laskentatapauksessa. Ohuet viivat kuvaavat yhtä laskenta- ja mittaustapausta, tummalla viivalla on merkitty poikkeamien keskiarvot.

Kuvassa 5 on esitetty 20 rakenteen lasketut ilmaääneneristysluvut  $R_{w,lask}$  arvot mitattujen ilmaääneneristyslukujen  $R_{w,mit}$  funktiona. Nämä yksilukuiset mittaluvut korreloivat keskenään hyvin: korrelaatiokerroin on 0,97. Keskiarvo poikkeamasta  $R_{w,lask} - R_{w,mit}$  on  $-0,3$  dB ja

keskihajonta 1,6 dB. Ohjelma ennusti siten ilmaääneneristysluvun keskimäärin muutaman kymmenyksen tarkkuudella oikein näissä 20 tapauksessa. Pyöristäen voidaan todeta, että ohjelman laskentatarkkuus ilmaääneneristyslukuille  $R_w$  on suurella todennäköisyydellä  $\pm 2$  dB. Tämä vastaa mittaasepävarmuutta ilmaääneneristyslukujen  $R_w$  laboratoriomittauksissa [21]. Johtopäätöksenä ohjelman laskentatarkkuuksista voidaan todeta, että ne vastaavat laboratoriomittausten ja tarkimpien olemassa olevien teoreettisten laskentamallien tarkkuuksia [14] sekä taajuuskaistoin laskettujen ilmaääneneristävyyksien  $R$  että ilmaääneneristyslukujen  $R_w$  osalta.



Kuva 5. Mitattujen ja laskettujen ilmaääneneristyslukujen korrelaatio 20 laskentatapauksessa.

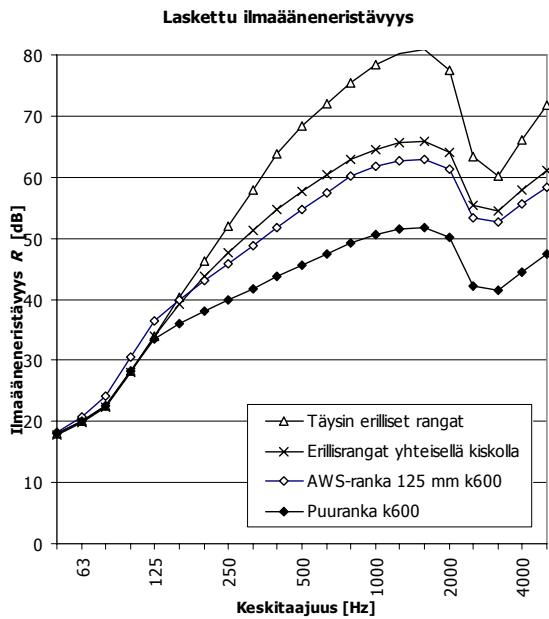
## 4. Esimerkkejä ilmaääneneristyslaskennasta

### 4.1 Rakenteen muutosten vaikutus ilmaääneneristävyyksiin

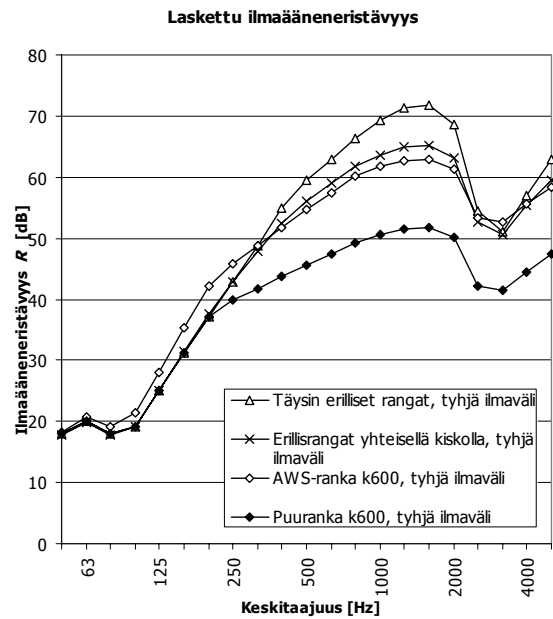
Ilmaääneneristävyyksien laskentaohjelmalla voidaan tarkastella erilaisten parametrien vaikutusta ilmaääneneristävyyksiin. Kuvissa on 6–9 on esitetty erilaisten muutosten vaikutusta rakenteeseen, jossa on kahden rakennekerroksen (n kpl kipsilevyjä N 13 mm) välissä ilmaväli. Ilmaääneneristävyyksiä on laskettu, kun seuraavat muuttujat vaihtelevat:

- kipsilevykerrosten välinen kytkentä (kuva 6)
- ilmavälin täyttö mineraalivillalla (kuva 7)
- kipsilevyjen määrä rakenteen puoliskoissa (kuva 8)
- rankojen k-jako (kuva 9)

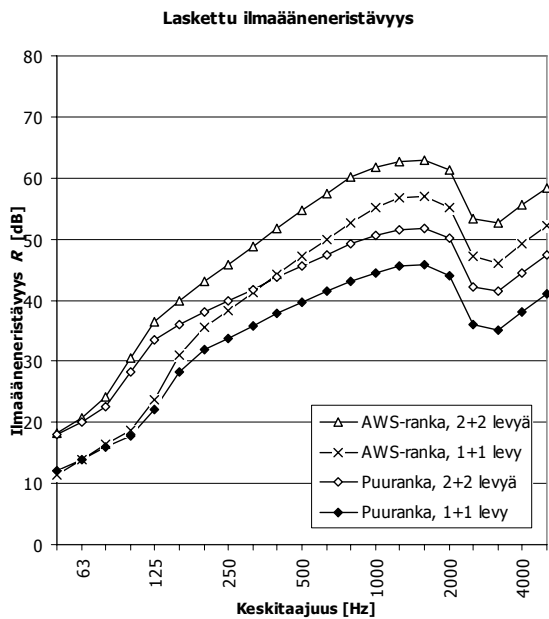
Tuotekehityshankkeista voidaan kuvissa 6–9 esitettyjä rakennevariaatioita tutkimalla sulkea esimerkiksi tuotekehityksessä pois rakennevaihtoehdot, joilla ei saavuteta tavoiteltavaa hyötyä. Laskennallisin tarkasteluin tämä on huomattavasti kustannustehokkaampaa ja nopeampaa kuin suorittaa vastaava määrä laboratoriomittauksia. Kuvissa esitettyjen tulosten aikaansaaminen laboratoriossa olisi vienyt aikaa vähintään kaksi viikkoa.



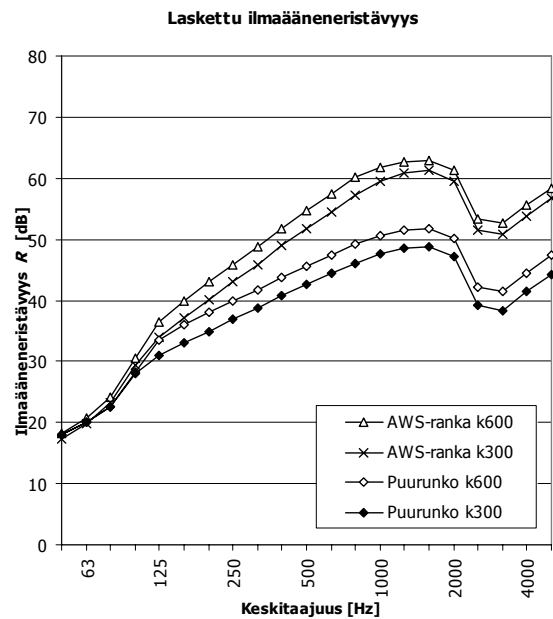
Kuva 6. Kipsilevykerrosten välisten kytkentöjen vaikutus saavutettaviin ilmasteneristävyksiin. Rakenteen molemmin puolin on kaksinkertainen kipsilevy N13 mm ja ilmatila kokonaan täytetty mineraalivillalla.



Kuva 7. Ilmatilan mineraalivillatäytön vaikutus saavutettaviin ilmasteneristävyksiin. Rakenteet ovat muuten samat kuin kuvassa 7, mutta kipsilevykerrosten välissä oleva ilmatila on tyhjä.



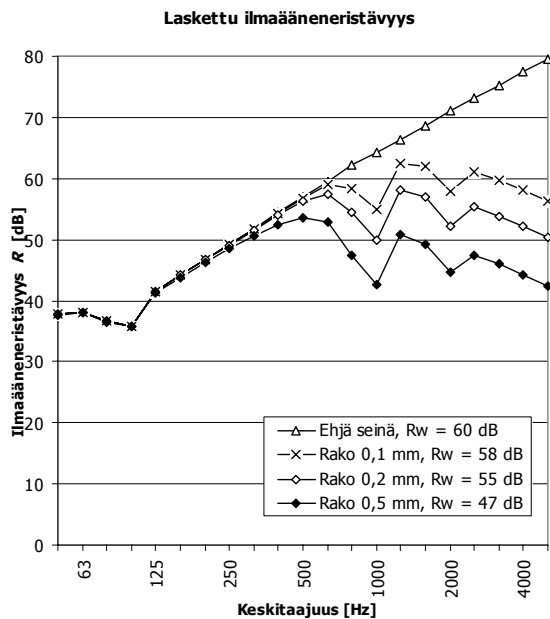
Kuva 8. Kipsilevykerrosten määrän vaikutus saavutettaviin ilmasteneristävyksiin. Rangan tyyppi vaihtelee, ilmaväli on täytetty mineraalivillalla.



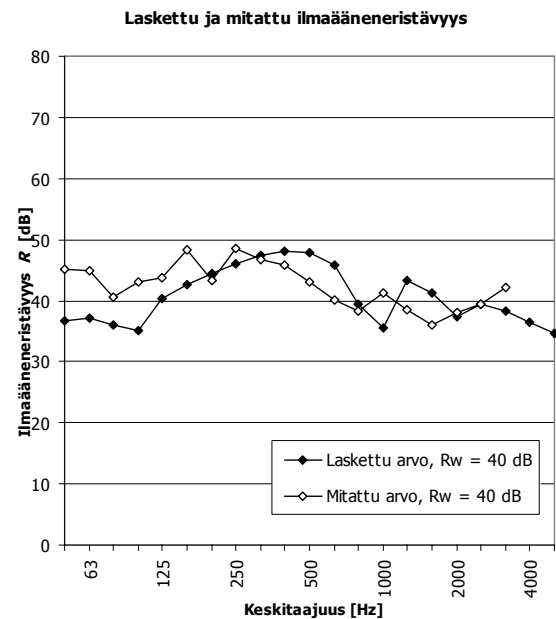
Kuva 9. Rankojen k-jaon vaikutus saavutettaviin ilmasteneristävyksiin. Rankojen tyyppi vaihtelee, kipsilevytys on rakenteen molemmin puolin kaksinkertainen.

## 4.2 Raon vaikutus ilmääneneristävyyteen

Kohdassa 4.1 esitetyllä tavalla on esimerkiksi rakennus- tai suunnitteluvirhettä epäiltäessä mahdollisuus selvittää, kuinka paljon ilmääneneristävyyksiin vaikuttavat poikkeukset suunnitelmista, esimerkiksi materiaalien vaihtaminen. Siten ilmääneneristävyyksien laskenta edistää myös oikeiden korjaustapojen soveltamista rakennusvirheisiin: vikojen selvittämiseksi rakenteita ei välttämättä tarvitse purkaa. Ohjelmalla on mahdollista tarkastella laskennallisesti rakojen vaikutuksia rakennusosien ääneneristyskykyyn. Kuvassa 10 on esitetty 180 mm paksun betoniseinän (koko 4 m x 2,5 m) ilmääneneristävyys ehjänä ja raollisena siten, että seinän toisessa pystysaumassa on leveydeltään vaihteleva rako. Kuvassa 11 on esitetty rakennuksessa mitatut saman rakenteen ilmääneneristävyydet sekä raon arvioidun leveyden perusteella lasketut arvot.



Kuva 10. Raon vaikutus 180 mm paksun teräsbetoniseinän ilmääneneristävyyksiin ja ilmääneneristyslukuihin.



Kuva 11. Rakennuksessa mitatun raollisen betoniseinän ilmääneneristävyyksien vertailu laskettuihin arvoihin.

## 5. Yhteenveto

Rakenteiden ilmääneneristävyydet ja ilmääneneristysluvut voidaan nykyisin määrittää tarkkuudella, joka on verrattavissa laboratoriomittauksissa saavutettavaan tarkkuuteen. Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n kehittämällä ILPO-laskentaohjelmalla voidaan määrittää erilaisten rakennusosien ilmääneneristysluvut  $R_w$  materiaali- ja rakenneominaisuuksien perusteella noin  $\pm 2$  dB tarkkuudella, joka vastaa laboratoriomittausten mittausepävarmuutta. Ilmääneneristävyyksien laskennallinen tarkastelu tarjoaa käytännön rakennushankkeissa ja tuotekehitysprojekteissa monia etuja: tuotekehityksessä voidaan laskennallisesti tarkastella erilaisten parametrien vaikutusta ilmääneneristävyyksiin ja sulkea pois rakennevaihtoehdot, joilla ei saavuteta tavoiteltavaa hyötyä. Ohjelmaa onkin hyödynnetty jo monissa rakennustuotekehityshankkeissa. Rakennusten suunnittelua varten kirjallisuudessa on vain rajallisesti tietoa erilaisten rakennevaihtoehdojen ääneneristysominaisuuksista. Rakennushankkeiden aikataulujen jatkuvasti lyhentyessä laboratoriomittausten tekemiseen ei useinkaan ole ajallisia mahdollisuuksia. Luotettava ja nopea vaihtoehto laboratoriomittauksille on rakenteiden ääneneristävyyksien laskennallinen tarkastelu.

## Lähdeluettelo

- [1] ISO 717-1. 1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Genève, International Organisation for Standardization.
- [2] Parjo, M. 1965. Uusien ja erikoisesti elementtirakenteisten asuinrakennusten ääneneristys. Helsinki, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennusteknillinen laboratorio.
- [3] Malinen, U. 1977. Ääneneristys kerrostaloissa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennustekniikan laboratorio, tiedonanto 37.
- [4] Kerrostalojen ääneneristys. 1979. Helsinki, Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö, Asukas-BES-tutkimuksen osaprojekti.
- [5] Betonirakenteiden äänitekniikka. 2000. Helsinki, Rakennustuoteteollisuus RTT ry.
- [6] Kylliäinen, M. 2008. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristykseen suunnittelu. Rakentajain Kalenteri 2009. Helsinki, Rakennustieto Oy, s. 382–393.
- [7] RIL 129, Ääneneristykseen toteuttaminen. 2003. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
- [8] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksissa. 1998. Helsinki, ympäristöministeriö.
- [9] Cambridge, J. E. 2006. An evaluation of various sound insulation software and their applications in the design of silent rooms. Master’s Thesis. Göteborg, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Applied Acoustics.
- [10] Gomperts, M. C. 1964. The “sound insulation” of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*. Vol. 14, s. 1–16.
- [11] Sharp, B. H. 1973. A study of techniques to increase the sound insulation of building elements. Washington DC, U.S. Department of Housing and Urban Development, PB222 829/4, Report No. WR 73-5.
- [12] Sharp, B. H. 1978. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 11, s. 53–63.
- [13] Kristensen, J. & Rindel, J. H. 1989. Byggningsakustik – teori og praksis. Glostrup, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166.
- [14] Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyyden ennustemalli. Helsinki, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2.
- [15] Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.
- [16] Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n ilmaääneneristyslukujen mittaustietokanta.
- [17] Olesen, H. S. 1992. Measurement of the acoustical properties of buildings – additional guidelines. Espoo, Nordtest, NT Technical Report 203.
- [18] ISO 140-3. 1995. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Genève, International Organization for Standardization.
- [19] Simmons, C. 1997. Measurements of sound pressure levels at low frequencies in rooms. Borås, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut SP, SP Report 1997:27.
- [20] Kylliäinen, M. 2003. Uncertainty of impact sound insulation measurements in field. Tampere, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Research Report 125.
- [21] ISO 140-2. 1991. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Determination, verification and application of precision data. Genève, International Organization for Standardization.

# Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ilmaääneneristävyys

Jussi Rauhala  
Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy

## Tiivistelmä

Eristerapattu betonielementtiulkoseinä eroaa perinteisesti ulkoseinärakenteena käytetystä betonisandwich-elementistä paitsi massansa myös akustisen toimintansa osalta. Tämä tarkoittaa sitä, että liikennemelualueilla ulkoa sisään voi siirtyä enemmän ääntä kuin betonisandwich-elementtien kautta. Lisäksi ulkoseinän kautta voi siirtyä enemmän ääntä asuinhuoneistosta toiseen. Tutkimuksessa on selvitetty kirjallisuuden perusteella eristerapatun ulkoseinärakenteen ilmaääneneristävyyteen sekä sen kautta huoneistojen välillä tapahtuvaan sivutiesiirtymään vaikuttavat oleelliset tekijät. Eristerapattujen ulkoseinärakenteiden ilmaääneneristävyysien määrittämiseksi on tutkittu neljä laskentamallia. Validoinnin perusteella luotettavimmaksi osoittautuneella laskentamallilla on määritetty eristerapattujen ulkoseinien eri rakennevariaatioiden ilmaääneneristävyysiksi. Ulkovaipan ääneneristyslaskelmien perusteella on annettu rakennesuositukset eri ulkovaipan äänitasoero vaatimusten yhteydessä käytettäväksi soveltuvista eristerapatuista ulkoseinistä. Huoneistojen välisten ilmaääneneristyslaskelmien perusteella on annettu eristerapattujen betoniulkoseinien rakennesuositukset, joilla ulkoseinän kautta tapahtuva sivutiesiirtymä on vastaava kuin ei-kantavan betonisandwich-elementin kautta.

## 1. Johdanto

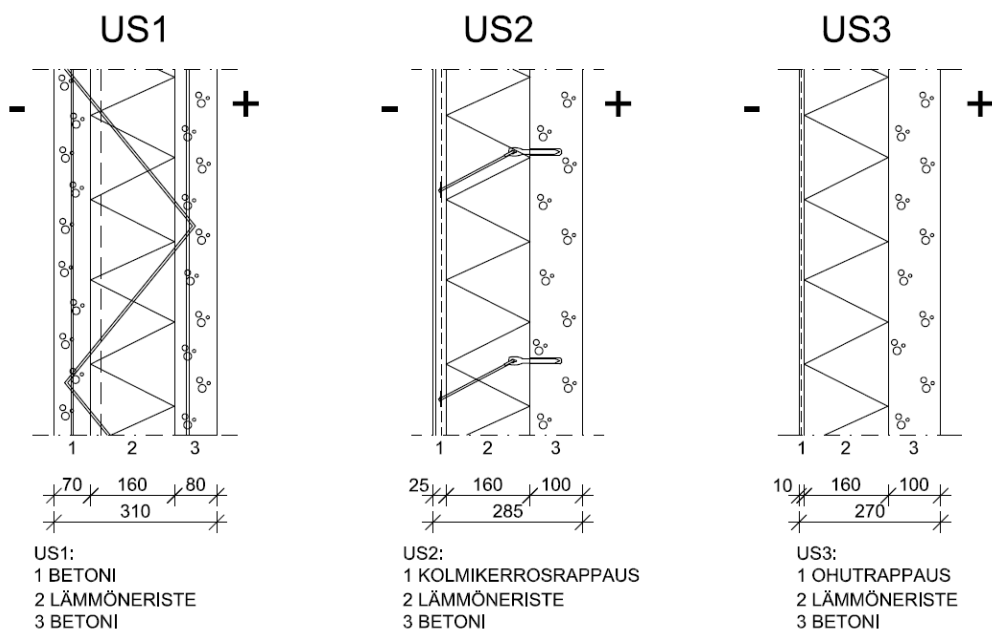
Betonielementtirakenteisen asuinkerrostalon rakennejärjestelmä on Suomessa ollut pitkään vakiintunut. Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö SBK julkaisi vuonna 1970 betonirakennusten rakenteita ja liitoksia koskevat Betonielementtistandardit. Niiden osana oli asuntorakentamista varten kehitetty BES-järjestelmä, joka yhdenmukaisti kerrostaloelementtien rakennevahvuudet ja liitokset lähes 30 vuodeksi. Järjestelmää kehitettäessä tehtiin myös laajoja ääneneristys selvityksiä [1, 2, 3]. Jo ennen niitä Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n vuonna 1967 julkaisemat ääneneristysnormit olivat asettaneet asuinkerrostalohuoneistojen väliselle ääneneristävyydelle vaatimustason, joka säilyi mittausmenetelmissä tapahtuneista muutoksista huolimatta käytännössä samana aina vuosituhannen vaihteeseen saakka.

Yleinen ulkoseinärakenne betonielementtirunkoisessa asuinkerrostalossa on ollut betonisandwich-elementti, jossa betoniset sisä- ja ulkokuori ovat sidottuina toisiinsa ansasraudoitteilla ja ytimenä on lämmöneriste (Kuva 1, US1). Betonisandwich-elementin ulkokuoren ja lämmöneristeen rakennekaksuudet ovat tiukentuneiden vaatimusten vuoksi kasvaneet BES-järjestelmän alkuajoista, mutta sisäkuoren rakennekaksuudet ovat pysyneet lähes vakioina. BES-järjestelmän mukaisesti virheettömästi rakennetussa asuinkerrostalossa on yleensä saavutettu asuinhuoneistojen väliseksi ilmaääneneristyslukuksi  $R'_w$  56...58 dB.

Uusissa asuinkerrostaloissa tehdään ääneneristysmittauksia esimerkiksi osana rakennuttajan edellyttämää laadunvalvontaa tai asukkaan tekemän valituksen perusteella. Viime vuosina näissä mittauksissa on havaittu, että Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 esitetyt vaatimukset asuinhuoneistojen väliselle ilmaääneneristävyydelle eivät aina täyty, eikä BES-taloissa aiemmin mitattuja ilmaääneneristyslukuja saavuteta huolimatta siitä, että välipohjan

rakennepaksuus ja ilmajääneristävyys ovat suuremmat kuin aiemmin.

Kuluneen vuosikymmenen aikana betonielementtirunkoisen asuinkerrostalon ulkoseinärakenteena on Suomessakin uudisrakentamisessa yleistynyt eristerapattu ulkoseinärakenne (kuva 1, US2 ja US3). Eristerappauksella tarkoitetaan ulkoseinän lämmöneristeen ja suoraan sen päälle tehdyn rappauksen yhdistelmää. Rappaus voidaan tehdä joko kolmikerros- tai ohutrappauksena. Lämmöneristeenä on Suomessa käytetty yleensä mineraalivillaa tai paisutettua polystyreeniä. Ulkoseinän sisäkuorena voi olla betonisisäkuori tai muurattu rakenne, johon lämmöneriste kiinnitetään liimaamalla. Liimauksen lisäksi kiinnityksessä voidaan käyttää mekaanisia kiinnikkeitä. Kolmikerrosrappaus muodostaa kuumasinkityllä teräksisellä rappausverkolla lujitetun noin 20...25 mm paksun levyn (kuva 1, US2). Rappausverkko on kiinnitetty mekaanisin kiinnikkein lämmöneristeen läpi seinän sisäkuoreen. Ohutrappaus muodostaa taipuisan lasikuituverkolla vahvistetun noin 5...10 mm paksun yhtenäisen levyn, joka on liimattu lämmöneristeeseen. Lämmöneriste on liimattu seinän sisäkuoreen (kuva 1, US3).



Kuva 1. Nykyiset ei-kantavat ulkoseinärakenteet. Kantavissa ulkoseinissä sisäkuoren paksuus on 150...160 mm.

BES-järjestelmän mukaan rakennetun asuinkerrostalon ääneneristävyys perustuu rakennusosien massaan ja liitosten jäykkyyteen. Ei-kantavan betonisandwich-elementin massa muodostuu sisä- ja ulkokuoren betonikerroksista. Eristerapatusta seinässä rappauskerroksen ja eristekerroksen massa on mitätön verrattuna sisäkuoren massaan, joten eristerapatun seinän massa on suunnilleen puolet betonisandwich-elementin massasta. Näin ollen myös sen ilmajääneristävyys on erilainen kuin betonisandwich-elementin. Yksi asuinhuoneistojen väliseen ilmajääneristävyyteen mahdollisesti vaikuttava tekijä voi siten olla ulkoseinärakenteen vaihtuminen betonisandwich-elementistä eristerapatuksi rakenteeksi. Tämän muutoksen vaikutuksia asuinkerrostalohuoneistojen väliseen ääneneristävyyteen ja rakenteelliseen sivutiesiirtymään ei ole Suomessa aiemmin juuri tutkittu.

Liikennemelualueille rakennettaessa rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyydelle asetetaan asemakaavassa vaatimus, jonka perusteella rakennuksen ulkovaipan rakennusosat valitaan ja niiden ääneneristävyys mitoitetaan. Ääni siirtyy ulkoa sisään huoneeseen ulkovaipan kaikkien rakennusosien kautta, joten niiden ilmajääneristävyys on tunnettava. Suomessa käytettävien



eristerapattujen ulkoseinärakenteiden ilmasteneristävyyksistä ei ole tietoa rakennusalan kirjallisuudessa. Koska eristerapatun ulkoseinärakenteen akustinen toiminta poikkeaa betonisandwich-elementistä, se voi vaikuttaa myös ulkovaipan ääneneristyksen suunnitteluun liikennemelualueilla ja ulkovaipan muiden rakennusosien valintaan.

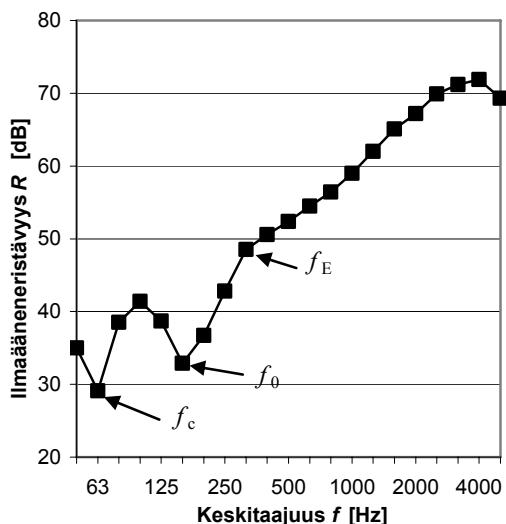
Tampereen teknilliselle yliopistolle tekemäni diplomityön [4] tarkoituksena oli selvittää eristerapatun ulkoseinärakenteen akustista toimintaa. Diplomityö on julkaistu rakennustekniikan laitoksen rakennetekniikan yksikön tutkimusraporttina [5]. Tutkimuksessa keskityttiin asuinkerrostaloihin, joissa seinän sisäkuori tavallisesti on 80...150 mm paksu betonielementti. Tutkimuksen tavoitteina oli:

- selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat eristerapatun ulkoseinärakenteen ilmasteneristävyyteen ja arvioida ilmasteneristävyyksiä laskennallisesti
- määrittää rakennuksen ulkovaipan ääneneristysmitoituksen lähtötiedoksi eristerapattujen ulkoseinärakenteiden ilmasteneristyslukuja liikennemelua vastaan ja
- arvioida ulkoseinärakenteen kautta tapahtuvaa sivutiesiirtymää ja laatia rakennesuunnittelua varten käytännöllinen ohje eristerapatun ulkoseinärakenteen valinnasta sivutiesiirtymästä johtuvien huoneistojen välisten ääneneristysongelmien välttämiseksi asuinkerrostaloissa.

## 2. Eristerapatun seinän ääneneristävyys

### 2.1 Eristerapatun ulkoseinän akustinen toiminta

Eristerapattu betonielementtiulkoseinä on massa-jousi-massasysteemi, jossa betonisisäkuoren ja rappauserroksen massat ovat kytkeytyneet toisiinsa lämmöneristeen muodostaman jousen välityksellä. Rakenteen ääneneristävyyden perustana on massalaki, jonka mukaan rakenteen ilmasteneristävyys kasvaa 6 dB, kun taajuus tai massa kaksinkertaistuu. Ääneneristävyyteen vaikuttaa lisäksi erityisesti kolme rajataajuutta (kuva 2), betonisisäkuoren koinsidenssin rajataajuus  $f_c$  ja rakenteen muodostaman massa-jousi-massasysteemin resonanssitaajuus  $f_0$  eli dilataatioresonanssi sekä eristerakenteeseen syntyvien seisovien aaltojen rajataajuus  $f_E$ . [6]



Kuva 2. Tyypillinen eristerapatun seinän ilmasteneristävyyskäyrä [7], jossa on nähtävillä rajataajuudet: sisäkuoren koinsidenssi  $f_c$ , dilataatioresonanssi  $f_0$  ja eristerakenteeseen syntyvien seisovien aaltojen rajataajuus  $f_E$ .

Koinsidenssin rajataajuus aina heikentää rakenteen ääneneristävyyttä massalakiin nähden. Betonisisäkuoren koinsidenssin rajataajuus vaihtelee sisäkuoren paksuuden ja materiaaliominaisuuksien mukaan. Sisäkuoripaksuuksilla 80...150 mm koinsidenssin rajataajuus vaihtelee välillä ~115...270 Hz ja on sitä korkeampi mitä ohuempi sisäkuori on.

Dilataatioresonanssi riippuu rakenteen puoliskojen massasta sekä eristekerroksen dynaamisesta jäykkyydestä  $s'$  [MN/m<sup>3</sup>]. Mitä pienempi eristeen dynaaminen jäykkyys on, sitä alhaisempi rakenteen dilataatioresonanssitaajuus on [8]. Eristeen dynaamisesta jäykkyydestä riippuen eristerapatulla ulkoseinäarakenteella saavutetaan massalakiin nähden joko parempi tai heikompi ääneneristävyys [6].

Dilataatioresonanssin jälkeen rakenteen ilmaääneneristävyys paranee, mutta parannus pienenee eristekerrokseen syntyvien seisovien aaltojen rajataajuuden  $f_E$  jälkeen [6]. Kyseinen rajataajuus on riippuvainen eristeen dynaamisesta jäykkyydestä, tiheydestä sekä paksuudesta. Dynaamisen jäykkyyden pienentyminen tai paksuuden ja tiheyden kasvaminen pienentävät rajataajuutta  $f_E$ .

## 2.2 Laskentamallit

Akustiikan kirjallisuudessa rakenteista, jotka koostuvat kahdesta levykerroksesta, joiden välissä on kevyempi ja usein joustavampi ydinkerros, käytetään termiä sandwich-rakenne. Kerrokset kiinnitetään toisiinsa yleensä liimaamalla, jolloin kiinnityslujuus perustuu liiman ja liimattavan kerroksen väliseen adheesioon ja liiman koheesioon. Siten myös eristerapatu ulkoseinä on sandwich-rakenne.

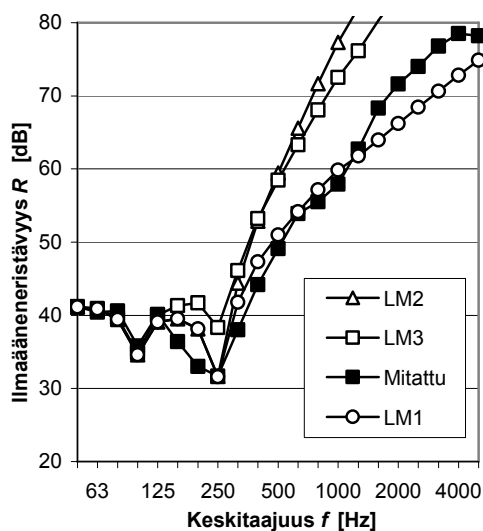
Tässä tutkimuksessa eristerapatut seinät käsitetään sandwich-rakenteiksi, joissa eriste on kokoonpuristuva ja dilataatioresonanssi on kuulon herkkyyden ja puheen taajuusjakauman kannalta merkittäväällä taajuusalueella eli rakennusakustisesti tärkeällä taajuusalueella 50...3150 Hz. Vaikka akustiikan kirjallisuudessa sandwich-rakenne on yleisesti käytetty käsite, tässä tutkimuksessa sitä ei käytetä koska se voisi sekoittua akustisesti täysin eri tavalla toimivaan betonisandwich-elementtiin. Jäljempänä eristerapatu seinä tarkoittaa rakennetta, joka akustiselta toiminnaltaan vastaa sandwich-rakennetta akustiikan kirjallisuudessa esitetystä merkityksessä.

Eristerapatun seinän ilmaääneneristävyyden määrittämiseksi on tutkittu neljä laskentamallia. Kolmella malleista määritetään ilmaääneneristävyydet taajuuksittain ja yhdellä mallilla määritetään ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan.

- Laskentamallissa 1 eristerapatun seinän ilmaääneneristävyys lasketaan summaamalla energieettisesti kuorien ja eristeen lasketut ilmaääneneristävyydet, josta vähennetään dilataatioresonanssin aiheuttama heikennys. Massalaki toisin sanoen asettaa rakenteen ilmaääneneristävyydelle ylärajan.[8]
- Laskentamallissa 2 eristerapatun seinän ilmaääneneristävyys paranee laskentamallia 1 enemmän dilataatioresonanssin jälkeen järjestelmän jousivaikutuksesta ja eristävyiden kasvu hidastuu eristekerroksen seisovien aaltojen rajataajuuden jälkeen.[6]
- Laskentamallissa 3 ajatellaan eristerapatun seinän lämmöneristekerroksen toimivan tärinäneristimenä, jolloin lämmöneristekerroksella on jousiominaisuuden lisäksi vaimennusominaisuus. Eristävyyden kasvu hidastuu rajataajuuden  $f_E$  jälkeen.[8]
- Saksalaisella yksinkertaisella laskentamallilla määritetään eristerapatun seinän yksilukuinen ilmaääneneristysluku  $R_w+C_{tr}$ . Malli on empiirinen, se perustuu laajoihin laboratoriomittauksiin. Mallissa otetaan huomioon sisäkuoren ilmaääneneristyskyky, lämmöneristeen tyyppi, massa-jousi-massasysteemin dilataatioresonanssi, sisäkuoren ja eristekerroksen välinen liimausala ja mekaanisten kiinnikkeiden käyttö.[6]

### 2.3 Laskentamallien validiteetti

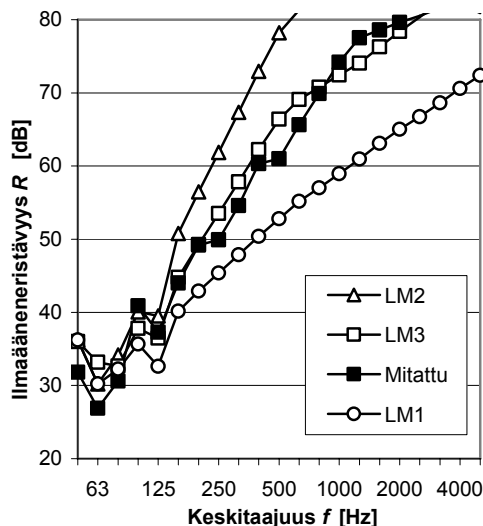
Laskentamallien kelpoisuutta tutkittiin vertailemalla niiden antamia ilmääneneristävyyksiä vastaavien rakenteiden laboratoriomittauksilla saatuihin arvoihin. Esimerkkirakenteissa pyrittiin varioimaan mahdollisimman laajasti eristerapattujen seinien rakennekerroksia ja niiden ominaisuuksia. Tutkituista lähteistä löytyi vain yksi mittaustulos, jossa rakenteen sisäkuorena oli betonirakenne, muissa esimerkkirakenteissa sisäkuorena on kalkkahiiekkakivinen tiilirakenne. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty vertailuja laskentamallien ja mittaustulosten välillä.



ISO 717-1 mukaiset ilmääneneristysluvut:

	$R_w$	$R_w+C$	$R_w+C_{tr}$
Mitattu	49 dB	47 dB	43 dB
Laskentamalli 1	52 dB	49 dB	45 dB
Laskentamalli 2	54 dB	49 dB	45 dB
Laskentamalli 3	56 dB	54 dB	50 dB
Saksalainen LM			45 dB

Kuva 3. Esimerkkirakenne 1, mitattu sekä laskentamalleilla 1, 2 ja 3 määritetyt ilmääneneristävyydet, sekä niistä määritetyt ilmääneneristysluvut.



ISO 717-1 mukaiset ilmääneneristysluvut:

	$R_w$	$R_w+C$	$R_w+C_{tr}$
Mitattu	62 dB	59 dB	54 dB
Laskentamalli 1	55 dB	54 dB	49 dB
Laskentamalli 2	69 dB	64 dB	59 dB
Laskentamalli 3	63 dB	60 dB	55 dB
Saksalainen LM			52 dB

Kuva 4. Esimerkkirakenne 5, mitattu sekä laskentamalleilla 1, 2 ja 3 määritetyt ilmääneneristävyydet, sekä niistä määritetyt ilmääneneristysluvut.

Toistaiseksi ei tarkalleen tiedetä mitä tapahtuu dilataatioresonanssin yläpuolisilla taajuuksilla. Materiaaliominaisuuksia tai rakenneominaisuuksia, jotka aiheuttavat ilmä-ääneneristävyyden vaihtelevan käyttäytymisen dilataatioresonanssin jälkeen ei tunneta. Laskentamalleissa 1, 2 ja 3 ei oteta huomioon mekaanisia kiinnikkeitä eikä liimausalaa, jotka ovat yksinkertaisessa mallissa

mukana. Näiden taajuussidonnainen vaikutus rakenteen ilmasteneristävyyteen on lähes mahdollista arvioida [6]. Vaikka laskentamalli 3 olisi luultavasti malleista kehityskelpoinen, edellyttäisi sen kehittäminen lukuisia laboratoriomittauksia ja tarkkoja materiaalitietoja, joiden perusteella laskentamallin validiteettia voitaisiin laajasti tarkastella.

Koska liikennemelun äänenpainetasot ovat suurimmillaan taajuusalueella, jolla eristerapattujen seinien ilmasteneristävyydet ovat heikoimmillaan, on eristerapattujen seinien ilmasteneristävyydet turvallisinta määrittää laskentamallilla, joka määrittää tämän taajuusalueen tarkimmin. Testatuista menetelmistä on laskentamalli 1 tässä suhteessa luotettavin. Siksi eristerapattujen ulkoseinien ilmasteneristysluvut määritetään rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä varten laskentamallilla 1. Laskentamallia 2 ja 3 ei käytetä, koska ei ole mahdollista selittää tekijöitä, joiden vuoksi laskentamalli välillä ennustaa eristävyyden tarkasti ja välillä yliarvioi. Tästä syystä toistaiseksi on tyydyttävä käyttämään laskentamallia 1, joka myös useissa tapauksissa ennustaa eristävyyden tarkasti ja on muutoin varmallalla puolella.

## 2.4 Lasketut rakennevariaatiot

Laskentamallilla 1 on laskettu eristerapattujen sisäkuorielementtiulkoseinärakenteiden ääneneristävyyksiä sekä niistä on määritetty rakennekohtaisesti ilmasteneristysluvut  $R_w$ ,  $R_w+C$  ja  $R_w+C_{tr}$ . Laskelmat on tehty neljällä eri sisäkuoren paksuudella, kahdella eri eristemateriaalilla, kolmella eri eristepaksuudella, sekä kahdella eri rappauspaksuudella, yhteensä eri ulkoseinärakenteita on laskettu 48 kappaletta. Laskelmissa on käytetty Suomessa yleisiä sisäkuorielementtien betonisäkuoren rakennepaksuuksia 80 mm, 100 mm, 120 mm ja 150 mm. Eristevaihtoehtoina olivat paisutettu polystyreeni EPS sekä Paroc Oy:n mineraaliviljat FAL1 ohutrappauksissa ja FAS4 kolmikerroseristerappausten yhteydessä. Laskelmien eristepaksuuksina on käytetty: 160 mm, 250 mm ja 450 mm. Rappauspaksuuksina laskelmissa on käytetty ohutrappaukselle 10 mm ja kolmikerroseristerappaukselle 25 mm.

## 3. Ulkovaipan mitoitus liikennemelualueilla

### 3.1 Ulkovaipan ääneneristystä koskevat määräykset

Rakennusten ulkoseinille ei ole Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annettu erillisiä ääneneristysmääräyksiä. Melualueille rakennettaessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että melu ei kantaudu liiaksi rakennuksen sisätiloihin heikentämään käyttäjien viihtyisyyttä tai vaarantamaan terveyttä. Erilaisten rakennusten sisätiloissa sallittaville melutasoille on annettu ohjeavot valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 § 3. Asuinhuoneiden ohjearvo päiväajalle (kello 7-22)  $L_{A,eq,7-22}$  on 35 dB ja yöajalle (kello 22-7)  $L_{A,eq,22-7}$  on 30 dB. Valtioneuvoston päätöksen mukaiset ohjeavot ovat pitkän ajan keskiäänitasoja, joten niiden saavuttaminen ei tarkoita sitä, ettei liikennemelun aiheuttama hetkellinen äänitaso voisi nousta sisätiloissa reilustikin korkeammaksi.

Ulkoseinät, ikkunat ja parvekeovet yhdessä muiden rakennusosien kanssa muodostavat rakennuksen ulkovaipan, jonka ääneneristystä koskevat vaatimukset annetaan asemakaavassa kaavamääräyksinä. Asemakaavassa esitettävä äänitasoerovaatimus  $\Delta L_{A,vaad}$  määritetään liikenteen rakennuksen julkisivun pinnalle aiheuttaman A-painotetun keskiäänitason ja sisällä valtioneuvoston päätöksen mukaan sallittavan A-painotetun keskiäänitason erotuksena. Äänitasoerovaatimukseksi valitaan päiväajalle ja yöajalle lasketuista erotuksista suurempi. Yleensä asemakaavassa esitettävät äänitasoerovaatimukset ovat luokkaa 28...35 dB, enintään 40 dB.

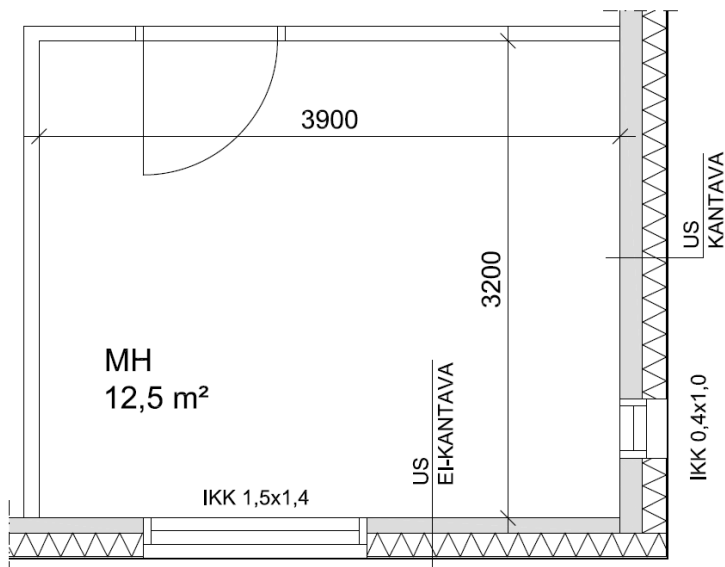
### 3.2 Äänitasoeromenetelmä

Nykyisin äänitasoeromenetelmänä tunnettu ulkovaipan ääneneristuksen laskentamenetelmä on esitetty alun perin vuonna 1975 RT-kortissa 084-30 [ks 9], menetelmän perusteella saadaan määriteltyä ikkunoilta vaadittava ilmaääneneristysluku. Ääni siirtyy kuitenkin samalla tavalla muidenkin rakennusosien kautta. Menetelmän mukaan voidaan määrittää kaikkien rakennusosien erikseen tuottamat äänitasoerot, jotka yhdistämällä saadaan selvitettyä koko huonetilan ulkovaipalla saavutettava äänitasoero.

Rakennuksen ulkovaipan yhden rakennusosan kautta saavutettava äänitasoero  $\Delta L_{A,i}$  saadaan lasketuksi rakennusosan pinta-alan  $S_i$  [m<sup>2</sup>], huoneen lattiapinta-alan  $S_H$  [m<sup>2</sup>] ja riippuen melulähteestä, jolle kaavamääräyksen äänitasoero on määritelty, standardin ISO 717-1 mukaisen rakennusosan ilmaääneneristysluvun joko  $R_w + C_{tr}$  tai  $R_w + C$  perusteella. Äänitasoero lasketaan jokaisen tarkasteltavan huoneen julkisivun rakennusosan kautta erikseen, minkä jälkeen lasketaan rakennusosilla yhteensä saavutettava äänitasoero  $\Delta L_{A,tot}$ . Kokonaisäänitasoeron tulee olla vähintään yhtä suuri kuin kaavamääräyksen edellyttämä äänitasoero  $\Delta L_{A,vaad}$ .

### 3.3 Esimerkkilaskelmat

Tarkasteltujen eristerapattujen ulkoseinärakenteiden käyttämistä tieliikennemelualueilla rakennuksen ulkoseinärakenteena selvitettiin äänitasoeromenetelmällä kuvan 5 esimerkkihuoneella, jonka mittasuhteet ja ikkunapinta-ala valittiin äänitasoeromenetelmän perusolettamusten mukaisiksi. Ulkovaipan kokonaisäänitasoerot laskettiin ikkunoiden ääneneristysarvoilla  $R_w + C_{tr}$  37 dB, 39 dB, 41 dB, 43 dB ja 45 dB. Laskettuja kokonaisäänitasoeroja verrattiin asemakaavan äänitasoerovaatimukseen  $\Delta L_{A,vaad}$  30 dB, 32 dB, 35 dB, 38 dB ja 40 dB. Suositeltavien rakenteiden perusteena on vähintään 120 mm paksu sisäkuori, joissain tapauksissa vaaditaan vähintään 150 mm paksu sisäkuori.



Kuva 5. Pohjakuva ulkovaipan ääneneristyslaskelmien esimerkkihuoneesta.

Ohutrappuja betonisisäkuorellisia ulkoseinärakenteita voidaan käyttää lämmöneristepaksuudesta ja -materiaalista riippumatta tavanomaisen 35 dB äänitasoerovaatimuksen yhteydessä. 38 dB äänitasoerovaatimus saavutetaan, kun ulkoseinän

betonisisäkuoren paksuus on 150 mm ja lämmöneristeenä 160 mm paksu mineraalivilla FAL1. Tarkastelluilla ohutrappuilla ulkoseinärakenteilla ei saavuteta 40 dB äänitasoero vaatimusta.

Kolmikerroseristerapattuja betonisisäkuorellisia ulkoseinärakenteita voidaan käyttää lämmöneristepaksuudesta ja -materiaalista riippumatta tavanomaisen 35 dB äänitasoero vaatimuksen yhteydessä. 38 dB äänitasoero vaatimus saavutetaan, lämmöneristepaksuudesta riippumatta, kun lämmöneristeenä on mineraalivilla FAS4, ja kun lämmöneristeenä on 450 mm paksu EPS. 40 dB äänitasoero vaatimus saavutetaan lämmöneristepaksuudesta riippumatta, kun lämmöneristeenä on mineraalivilla FAS4.

Ulkovaipan ääneneristys on tilakohtainen ilmiö, yhdellä esimerkkitapauksella ei ole mahdollista kattaa kaikkia laskentavariaatioita. Eri rakennusosien pinta-alojen muutokset, huoneen lattiapinta-alan muutos tai parvekeoven lisääminen saattavat oleellisesti muuttaa saavutettavaa kokonaisäänitasoeroa. Siksi käytännön rakennushankkeessa on aina osoitettava rakennuslupavaiheessa kaavamääräyksen toteutuminen huonekohtaisilla ulkovaipan ääneneristyslaskelmilla.

## 4. Eristerappauksen vaikutus sivutiesiirtymään

### 4.1 Kirjallisuusselvitys

Saksassa on tutkittu laboratorio-olosuhteissa eristerappauksen vaikutusta massiivisen kiviseinän toimintaan rakenteellisena sivutiesiirtymäreittinä [10]. Näiden tutkimusten päätulokset olivat:

- Sivutiesiirtymiä eristerappauksen kautta ei yleensä tarvitse ottaa huomioon.
- Eristerappauksella ei ole merkittävää vaikutusta liitoseristävytyteen.
- Eristerappauksen vaikutus sivutiesiirtymään johtuu pääasiassa siitä, että eristerapatun ulkoseinärakenteen rakenteellinen jälkikaiunta-aika on lyhyempi kuin pelkän sisäkuorirakenteen (etenkin lähellä dilataatioresonanssia).
- Seinä eristää ääntä eri tavalla tasoaan vastaan kohtisuorassa suunnassa ja tasonsa suunnassa. Eristerappaus ei vaikuta huoneistojen väliseen ääneneristykseen.

### 4.2 Ääneneristyslaskelmat

Huoneistojen väliset ääneneristyslaskelmat tehtiin Bastianilla, jolla voidaan laskea tilojen välisiä ääneneristävyksiä standardin EN 12354 osien 1...3 mukaisesti. Ohjelma laskee standardin tarkan mallin mukaisesti, jolloin laskenta suoritetaan taajuusriippuvaisesti. Laskelmien rakenne- ja huonekokovariaatiot valittiin siten, että ne parhaiten edustaisivat tutkittavaa ulkoseinän kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän ongelmaa ja ovat elementtitekniikalla toteutettavissa. Huoneistojen välisten ilmaääneneristyslaskelmien eristerapattuna ulkoseinärakenteena on käytetty pelkkää betonirakenteista sisäkuorta, koska tutkimuskirjallisuuden mukaan eristerappaus ei juuri vaikuta ulkoseinärakenteen kautta huoneistojen välillä tapahtuvaan sivutiesiirtymään.

Taulukossa 1 on esitetty erikokoisten vierekkäisten huoneiden laskettuja ilmaääneneristyslukuja  $R_w^*$ , kun ulkoseinärakenteena on joko ei-kantava betonisandwich-elementti tai eri paksuiset sisäkuorielementit.

Taulukko 1. Vierekkäisten huoneiden välisiä ilmajääneneristyslukuja  $R'_w$ , kun huoneistoja erottavana seinänä on 180 mm paksu betoniseinä.

Huoneiden mitat			Huoneiden välinen ilmajääneneristysluku $R'_w$ [dB], kun sisäkuoren paksuus on				
Pituus [m]	Leveys [m]	Lattia-ala [m <sup>2</sup> ]	SW	150 mm	120 mm	100 mm	80 mm
4	3,6	14,4	57,1	57,0	56,0	55,1	54,1
	4,8	19,2	56,9	56,8	56,0	55,3	54,5
	6,0	24,0	56,8	56,6	56,0	55,4	54,7
	7,2	28,8	56,6	56,4	55,9	55,4	54,8
7	3,6	25,2	56,5	56,4	55,2	54,3	53,3
	4,8	33,6	56,4	56,2	55,3	54,6	53,8
	6,0	42,0	56,2	56,0	55,3	54,7	54,0
	7,2	50,4	56,0	55,8	55,3	54,7	54,2
10	3,6	36,0	56,2	56,1	54,9	53,9	53,0
	4,8	48,0	56,1	55,9	55,0	54,2	53,5
	6,0	60,0	55,9	55,7	55,0	54,4	53,7
	7,2	72,0	55,7	55,5	54,9	54,4	53,9

Bastianilla tehtyjen laskelmien perusteella vierekkäiset huoneet tulevat huoneistojen välisen ilmajääneneristyksen kannalta mitoittavaksi tapaukseksi. Ulkoseinän kautta tapahtuva sivutiesiirtymä eristerapatuilla ulkoseinillä vastaa betonisandwich-elementtirakenteista ei-kantavaa ulkoseinää, kun eristerapatun ulkoseinän sisäkuoren paksuus on vähintään 150 mm. Kun välipohjarakenteet ja huoneistojen sisäinen väliseinä sekä rakenteiden väliset liitokset ovat vakioina, ei-kantavan betonisandwich-elementtirakenteisen ulkoseinän ja 180 mm paksun huoneistoja erottavan betoniseinän kanssa saavutettava huoneistojen välinen ilmajääneneristävyys on vastaava kuin rakenneyhdistelmillä:

- Eristerapatu ulkoseinä, jonka sisäkuoren paksuus on 150 mm, ja 180 mm paksu huoneistoja erottava betoniseinä.
- Eristerapatu ulkoseinä, jonka sisäkuoren paksuus on 120 mm, ja 200 mm paksu huoneistoja erottava betoniseinä.

## 5. Yhteenveto

Eristerapatu betonielementtiulkoseinä on massa-jousi-massasysteemi, jossa betonisisäkuoren ja rappauserroksen massat ovat kytkeytyneet toisiinsa lämmöneristeen muodostaman jousen välityksellä. Rakenteen ilmajääneneristävyys perustana on massalaki, jonka mukaan rakenteen ilmajääneneristävyys kasvaa 6 dB, kun taajuus tai massa kaksinkertaistuu. Ääneneristävyteen vaikuttaa lisäksi erityisesti kolme rajataajuutta, betonisisäkuoren koinsidenssin rajataajuus  $f_c$  ja rakenteen dilataatioresonanssi  $f_0$  sekä rajataajuus  $f_E$ .

Merkittävin ääneneristävyteen vaikuttavista rajataajuuksista on dilataatioresonanssi  $f_0$ , joka riippuu rakenteen puoliskojen massasta sekä eristeroksen dynaamisesta jäykkyydestä  $s'$  [MN/m<sup>3</sup>]. Mitä pienempi eristeen dynaaminen jäykkyys on, sitä alhaisempi rakenteen dilataatioresonanssitaajuus on.

Eristerapatun seinän ilmasteneristävyyden määrittämiseksi on tutkittu neljä laskentamallia. Kolmella malleista määritetään ilmasteneristävyydet taajuuksittain ja yhdellä mallilla määritetään ilmasteneristysluku tieliikennemelua vastaan. Validoinnin perusteella laskentamalli 1 osoittautui laskentamalleista luotettavimmaksi. Siinä kuorien ja eristeen massalain mukaiset ilmasteneristävyydet summataan energeettisesti ja vähennetään dilataatioresonanssin aiheuttama heikennys.

Laskentamallilla 1 on määritetty eristerapatujen ulkoseinien eri rakennevariaatioiden ilmasteneristävyyksiä. Näiden käyttämistä tieliikennemelualueilla selvitettiin ulkovaipan ääneneristyslaskelmilla esimerkkihuoneen avulla. Eristerapatut betonisisäkuorelliset ulkoseinä rakenteet soveltuvat yleensä kohteisiin, joissa ulkovaipan äänitasoero vaatimus on enintään 35 dB. Myös tätä korkeammat äänitasoero vaatimukset ovat osalla rakenteista mahdollista täyttää.

Huoneistojen välisessä ilmasteneristyksessä ulkoseinä toimii yhtenä tai useampana äänen sivutiesiirtymäreittinä. Tehdyn kirjallisuusselvityksen tulos on se, että eristerappaus ei vaikuta huoneistojen välillä tapahtuvaan äänen sivutiesiirtymään. Eristerapatun ulkoseinän, jonka betonisisäkuoren paksuus on 150 mm, kautta tapahtuva sivutiesiirtymä on vastaava kuin eikantavalla betonisandwich-elementillä.

## Lähdeluettelo

- [1] Parjo, M. 1965. Uusien ja erikoisesti elementtirakenteisten asuinrakennusten ääneneristys. Helsinki, Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Rakennusteknillinen laboratorio. 96 s.
- [2] Malinen, U. 1977. Ääneneristys kerrostaloissa. Espoo, VTT, Rakennustekniikan laboratorio, tiedonanto 37. 207 s.
- [3] Arkkitehtitoimisto Alpo Halme. 1979. Kerrostalojen ääneneristys. Helsinki, Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö, Asukas-BES-tutkimuksen osaprojekti. 92 s.
- [4] Rauhala, J. 2009. Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ilmasteneristävyys. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta, rakennustekniikan laitos. 109 s. + 83 liites.
- [5] Rauhala, J. ja Kylliäinen, M. 2009. Eristerapatun betoniseinän ilmasteneristävyys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, rakennetekniikan yksikkö, tutkimusraportti 142. 119 s. + 83 liites.
- [6] Weber, L. & Brandstetter, D. 2003. Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen. Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP-Bericht B-BA 6/2002. 110 s.
- [7] Hongisto, V. 2003. Monikerroksisen seinärakenteen ilmasteneristävyyden ennustemalli. Turku, Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2. 106 s. + liitteet 107 s.
- [8] Füreder, S., Kloimstein, H. & Müller, M. 2007. Die Auswirkungen von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) auf die Schalldämmung von Ziegelwänden. Diplomarbeit. Linz, HTL1 Bau und Design, Höhere technische Bundeslehranstalt. 302 s.
- [9] Kylliäinen, M. 2009. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristuksen suunnittelu. Rakennustieto Oy, Rakentajain kalenteri 2009. s. 382-393.
- [10] Weber, L., Zhang, Y. & Brandstetter, D. 2003. Untersuchung der Schall-Längsdämmung von Außenwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP-Bericht B-BA 4/2002. 51 s.



# Raideliikenteen värinä ja runkomelu; arviointi- ja vaimennusmenetelmät viimeaikaisissa kohteissa

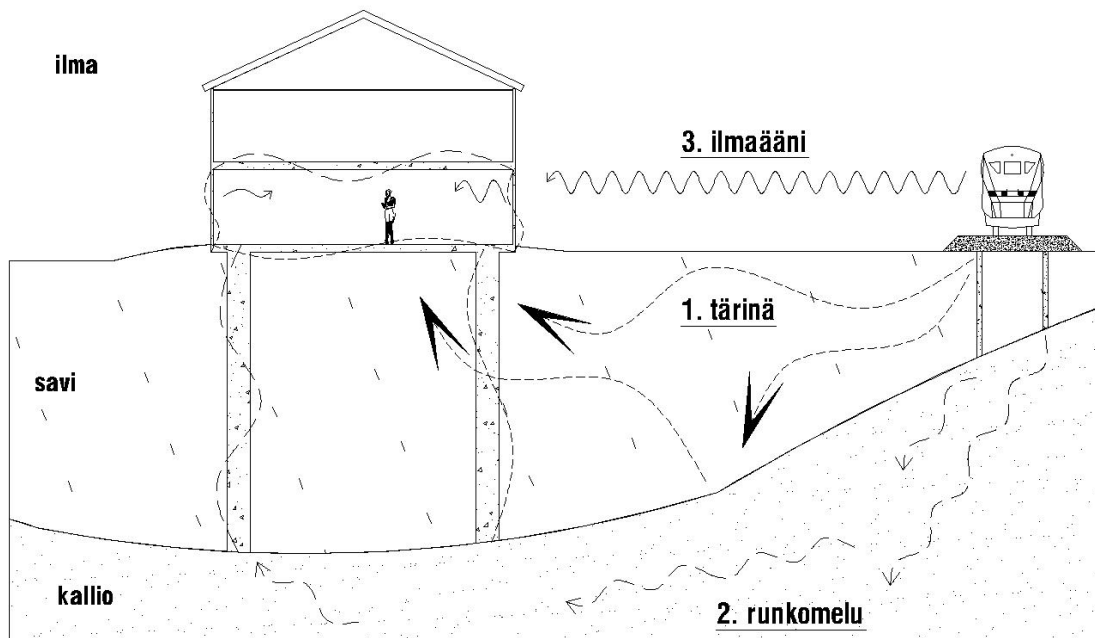
Timo Huhtala  
Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy

## Tiivistelmä

Raideliikenne voi aiheuttaa rakennuksiin värinää, runkomelua ja rakenteellisia vaurioita. Ilmiö on tunnettu pitkään ja rakentamista ohjaavissa laeissa ja asetuksissa se on määrätty otettavaksi huomioon. Viime vuosina värinän ja runkomelun arviointimenetelmät sekä suositukset raja-arvoiksi ovat kehittyneet nopeasti. Lisäksi yhdyskuntarakenteen tiivistyminen ja maankäytön tehostaminen ovat samanaikaisesti johtaneet lisääntyneeseen rakentamiseen rautateiden läheisyyteen. Siksi yhä useammassa hankkeissa tehdään erilaisia värähtelyvaimennusratkaisuja riittävän hyvien asuin- ja työskentelyolosuhteiden saavuttamiseksi.

## 1. Johdanto

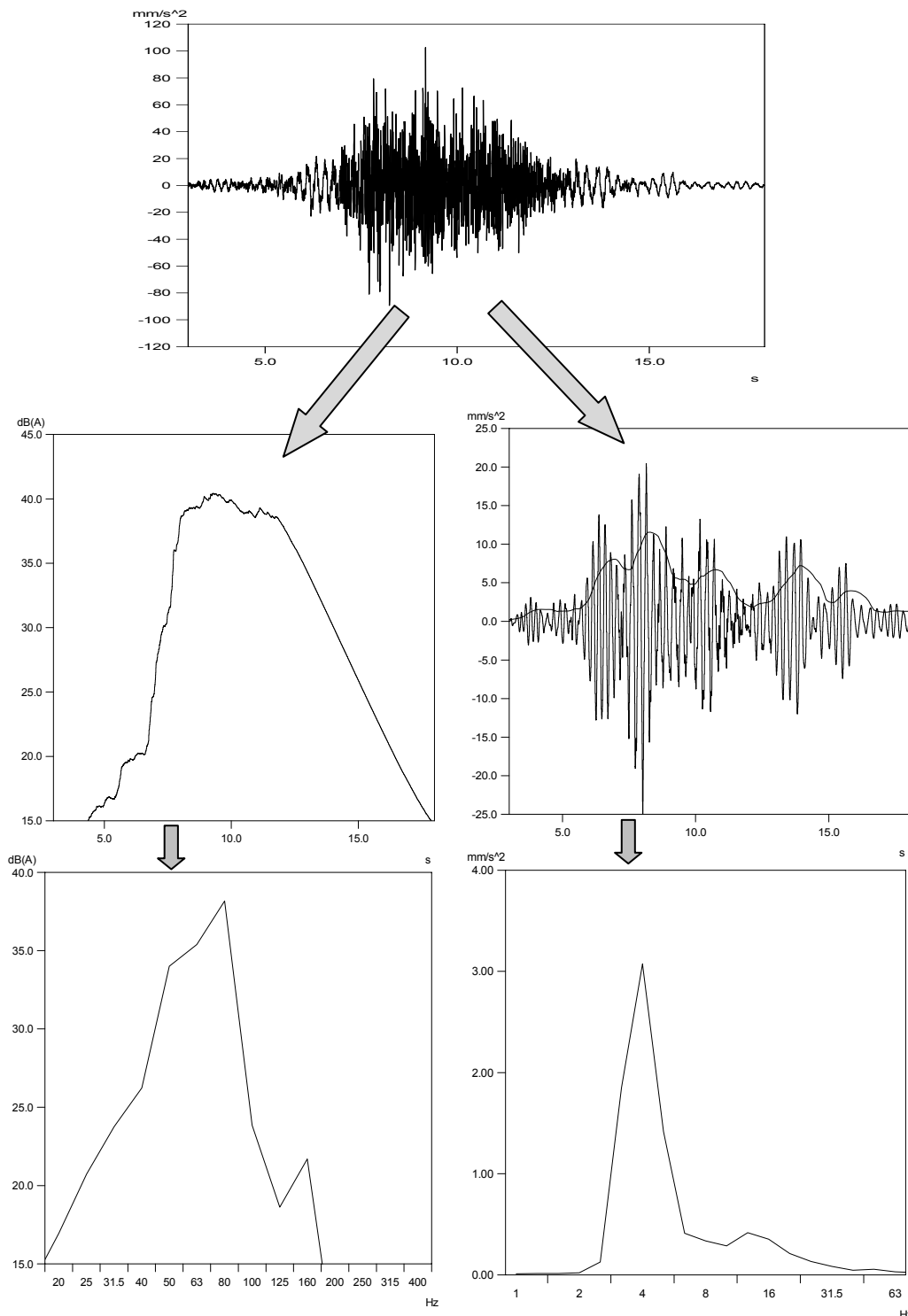
Raideliikenne aiheuttaa radanperustuskerrokseen värähtelyä, joka leviää maaperässä ja saa rakennuksen perustukset ja edelleen sen kaikki rakenteet värähtelemään. Rakennuksessa värähtely voi ilmetä värinänä, runkomeluna tai äärimmäisissä tapauksissa jopa rakenteellisina vaurioina. Avoradoilla raideliikenne aiheuttaa lisäksi ilmaääntä, joka siirtyy rakennukseen sisään ulkovaipan läpi (kuva 1). Asukas tai tilan käyttäjä eli häiriölle altistuja havaitsee värinän tuntoaistin välityksellä liikkeenä, kun taas runkomelun hän havaitsee kuuloaistinsa välityksellä matalana äänenä, jonka taajuus on pieni.



Kuva 1. Raideliikenne aiheuttaa avoradoilla ilmaäänen lisäksi myös maaperän värähtelyä, joka havaitaan rakennuksessa värinänä tai runkomeluna.

Ihminen aistii värinän herkimmin alle 10 Hz taajuuksilla mutta kuulokyvyn alaraja pienillä taajuuksilla on noin 20 Hz. Pienillä taajuuksilla kuuloaistin herkkyys paranee taajuuden

kasvaessa. Pehmeät maalajit, kuten savi ja siltti, siirtävät tehokkaimmin värinän kannalta oleellisia pieniä taajuuksia, kun taas kovat maalajit, kuten kallio, siirtävät tehokkaimmin runkomelun kannalta oleellisia suurempia taajuuksia Värinän kannalta merkitsevimmät taajuudet ovat yleensä välillä 1...40 Hz ja runkomelun 25..250 Hz (kuva 2).



Kuva 2. Ylhäällä maaperästä mitattu kiihtyvyyssignaali junan ohituksen ajalta. Keskirivissä vasemmalla runkomelun äänitaso  $L_{A,S}$  ja oikealla värinän taajuuspainotettu kiihtyvyys  $a_w$  sekä sen tehollisarvo  $a_{w,RMS}$  kyseisen ohituksen ajalta laskettuna. Alhaalla vasemmalla runkomelutasot ja oikealla värinätasot terssikaistoittain esitettyinä. Runkomelun kannalta merkitsevät terssikaistat ovat välillä 40...100 Hz ja värinän kannalta välillä 3,15...6,3 Hz.

Tärinän tapauksessa altistuja osaa yleensä yhdistää ilmiön tärinälähteeseen, vaikka tärinä voi olla häiritsevää vielä hyvin suurillakin etäisyyksillä. Esimerkiksi painavan tavarajunan liikennöidessä täydessä vauhdissa pehmeillä maaperäalueilla, tärinä voi olla häiritsevää jopa 1000 metrin etäisyydellä asti. Avoradoilla runkomelun osuutta rakennuksen ulkovaipan läpi sisään siirtyneestä melusta on usein vaikeaa tai jopa mahdotonta erottaa. Tällöin runkomelun vaikutus kokonaisuutena jää pääsääntöisesti ottamatta huomioon ja altistuja arvioi meluhaitan olevan seurausta ainoastaan ulkovaipan läpi sisään siirtyneestä melusta. Tunnelissa kulkevan raideliikenteen rakennukseen tuottama runkomelu sen sijaan on helpommin eroteltavissa muusta melusta, kunhan altistuja osaa yhdistää melun äänilähteeseen. Tämä on usein kuitenkin vaikeaa näköyhteyden puuttumisen vuoksi.

## 2. Arviointikriteerit ja ohjearvot

### 2.1 Tärinää ja runkomelua koskevat säädökset

Tärinä- ja runkomeluhaitta on useissa laeissa ja asetuksissa määritelty turvallisuuteen, terveyteen ja asumisviihtyvyyteen vaikuttavaksi tekijäksi ja täten määrätty otettavaksi huomioon alueiden suunnittelussa, kaavoituksessa sekä asuntojen ja väylien suunnittelussa [1], [2], [3] ja [4]. Mahdollinen haitta voidaan rinnastaa ympäristövahingoksi, ja laeissa on määritelty myös vastuu- ja korvausvelvollisuudet [5]. Käytettäviä mittalukuja ja ohjearvoja näissä ei kuitenkaan ole mainittu.

### 2.2 Tärinä

Teknisinä mittalukuina määriteltyjä raja-arvoja Suomessa ei toistaiseksi ole säädöstasoisissa rakentamismääräyksissä. Sitä vastoin VTT:n vuonna 2004 julkaisema ”Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokittelusta” sisältää mittausohjeiden lisäksi suositukset tärinätasojen ohjearvoista [6]. Niitä täydennettiin vuonna 2006 ilmestyneellä julkaisulla ”Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa”, jossa annettiin tarkempia ohjeita mm. kaavoitusvaiheen selvitysten tekemiseen [7]. Viime vuonna julkaistiin raportti ”Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi”, joka antoi ohjeet siitä miten maaperästä mitattujen tärinätasojen avulla voidaan arvioida rakennuksessa saavutettavat tärinätasot [8]. Ohje ottaa taajuuskaistoittain huomioon tärinän siirtymisen maaperästä perustuksiin sekä voimistumisen rungossa ja lattiarakenteissa. Ohjeen mukaisen tarkastelun lopputuloksena tärinätasot arvioidaan erikseen vaakasuuntaisten mittaustulosten perusteella rakennuksen rungolle ja pystysuuntaisen värähtelyn perusteella lattioille.

Tärinän arviointikriteeriksi ohjeissa on esitetty tärinän tilastollista tunnuslukua, joka voidaan esittää joko kiihtyvyyden tai nopeuden suhteen. Tunnusluku määritellään 15 merkitsevimmän mittaustuloksen perusteella ja kiihtyvyydelle se voidaan laskea kaavalla

$$a_{w,95} = \overline{a_w} + 1,8\sigma \quad (1)$$

missä  $\overline{a_w}$  = 15 merkitsevimmän ohituksen taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvojen huippuarvojen keskiarvo (vrt. kuva 2) ( $\text{m/s}^2$ )  
 $\sigma$  = 15 merkitsevimmän ohituksen taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvojen huippuarvojen keskihajonta ( $\text{m/s}^2$ )

Jotta tunnusluku kuvaisi ihmisen kokemaa häiriötä, käytetään tulosten laskennassa taajuuspainotusta, joka ottaa huomioon ihmisen aistiherkkyuden eri taajuiselle tärinälle [9]. Tilastollisen tunnusluvun määritelmä on, että satunnaisesti mitattu ohitus ei 95 % todennäköisyydellä ylitä kyseistä tunnuslukua. Tunnusluville on annettu tärinän häiritsevyyden perusteella neljä raja-arvoa, joiden perusteella kohde voidaan määritellä johonkin tärinäluokista A, B, C tai D. Luokituksessa A on paras mahdollinen ja C edustaa tavoitetasoa uudisrakentamisessa.

Tunnusluvun määrittämisessä VTT:n suositukset esittävät käytettäväksi yhden viikon pituista mittausjaksoa, vaikka suosituksen pohjana ollessa norjalaisessa standardissa NS 8176 on arvioinnin perusteena käytetty huomattavasti lyhyempää mittausjaksoa [10]. Käytännössä ja viimeaikaisissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että myös lyhyemmän mittausjakson mukaisilla tuloksilla on mahdollista arvioida tärinähaitta luotettavasti. Erityisesti tämä pätee kohteissa, joissa liikennöinti toistuu päivittäin samanlaisena samalla kalustolla [11].

### 2.3 Runkomelu

Runkomelun osalta vastaavassa laajuudessa ohjeistukset ovat osittain vasta tekeillä. Vuoden 2009 alussa VTT julkaisi esiselvityksen ”Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi”, jossa esitettiin suositukset runkomelutasojen ohjearvoiksi” [12]. Ohjearvojen lisäksi esiselvitys sisälsi yhdysvaltalaisiin laskentamalleihin perustuvan laskennallisen arviointimenetelmän [13], [14]. Laskennallisen arviointimenetelmän tarkkuus ei kuitenkaan ole lähellä mittausmenetelmällä saavutettavaa tarkkuutta, jolloin laskennallinen arvio soveltuu lähinnä yleiskaavatasolla tehtävään aluesuunnitteluun [12]. Kuitenkin jo ennen VTT:n esiselvitystä on alalla jo pitkään ollut vakiintuneena mittausmenetelmä sekä yleisesti sovelletut raja-arvot runkomelulle [15], [16].

Esiselvityksessä VTT:n runkomelun arviointikriteeriksi on esitetty tilastollista runkomelutasoa  $L_{prm}$ , joka määritellään kaavalla

$$L_{prm} = L_{pAS \max, mean} + 1,65s \quad (2)$$

missä  $L_{pAS \max, mean}$  = A-taajuuspainotusta ja slow-aikapainotusta käyttämällä määritettyjen enimmäisäänitasojen keskiarvo (dB)  
 $s$  = A-taajuuspainotusta ja slow-aikapainotusta käyttämällä määritettyjen enimmäisäänitasojen standardihajonta (dB)

Runkomelutason määrittämisessä tulee käyttää vähintään viiden ohituksen mittaustulosta kolmelta tiheimmin liikennöivältä liikennevälinetyypiltä. VTT on määritellyt erilaisia rakennustyyppisiä, kuten asuinhuoneistoja, majoitustiloja, oppilaitoksia ja toimistoja varten ohjearvoja sallittavalle runkomelutasolle.

## 3. Vaimennusratkaisujen suunnittelu

### 3.1 Vaimennusratkaisujen peruseriaatteet

Värähtelyn etenemistä lähteestä kohteeseen voidaan vähentää erilaisilla vaimennusratkaisuilla, jotka voidaan sijaintinsa perusteella jakaa kolmeen eri luokkaan. Värähtelylähteeseen vaikuttavia ratkaisuja ovat muun muassa väylän kunnossapito, liikennöivä kalusto, liikennöintinopeus, väylän perustamistapa sekä erilaiset väylän yhteyteen sijoitettavat eristusratkaisut. Yleensä

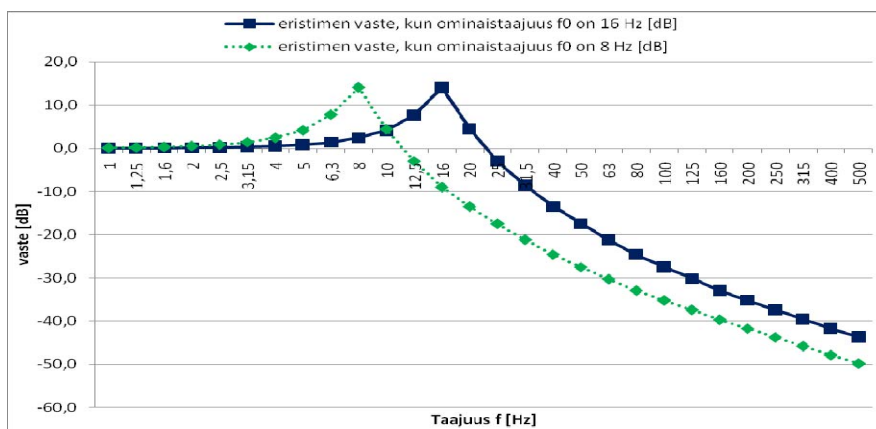
värähtelylähteeseen vaikuttavat ratkaisut tulevat kysymykseen uuden väylän rakentamisen tai olemassa olevan väylän peruskorjauksen yhteydessä. Lähteeseen vaikuttavien ratkaisuiden olennainen etu on kuitenkin, että ne vaikuttavat tärinä- ja runkomelutasoihin yleensä kaikkialla väylän ympäristössä.

Siirtymäreitillä eli maaperässä vaikuttavat ratkaisut perustuvat maaperän akustisen impedanssin muutokseen, joka pyritään saamaan aikaan esimerkiksi stabiloimalla pehmeä savikerros kalkki-sementtipilareiden avulla. Siirtymäreitille suunniteltavien vaimennusrakenteiden puutteena on, että ne tulee sijoittaa yleensä huomattavan pitkälle matkalle lähelle lähdettä tai vaihtoehtoisesti lähelle suojattavaa kohdetta, jolloin niiden vaimennusvaikutus saavutetaan vain suojatussa kohteessa. Lisäksi niillä saavutettavan taajuuskaistaisen vaimennuksen arvioiminen etukäteen sekä pysty- että vaakasuuntiin on jossain määrin epätarkkaa. Kuitenkin tietyissä tapauksissa myös siirtymäreitille vaikuttavat vaimennusmenetelmät voivat tulla kysymykseen. Tällaisia tapauksia ovat muun muassa tilanteet, joissa sekä kohde ja väylä ovat jo olemassa eikä niiden ominaisuuksiin pystytä vaikuttamaan tai uuden, joka tapauksessa stabiloitavan väylän rakentaminen lähteen ja kohteen välille.

Yleisin käytännön suunnitteluongelma on tilanne, jossa jo olemassa olevan väylän läheisyyteen kaavoitetaan uusi rakennusalue tai rakennetaan uusi rakennus. Tällöin vaimennusratkaisuna käytetään itse kohteeseen sijoitettavia tärinäeristimiä. Eristimien etuna on, että niillä saavutetaan yleensä hyvä vaimennus ja järjestelmän vaste on taajuuskaistoittain laskennallisesti arvioitavissa suunnittelun kannalta riittävällä tarkkuudella. Vaimennusratkaisujen lisäksi rakennuksien tärinän ja runkomelun hallinnan kannalta oleellista on lisäksi välttää värähtelyn voimistumista rakenteissa resonanssin seurauksena.

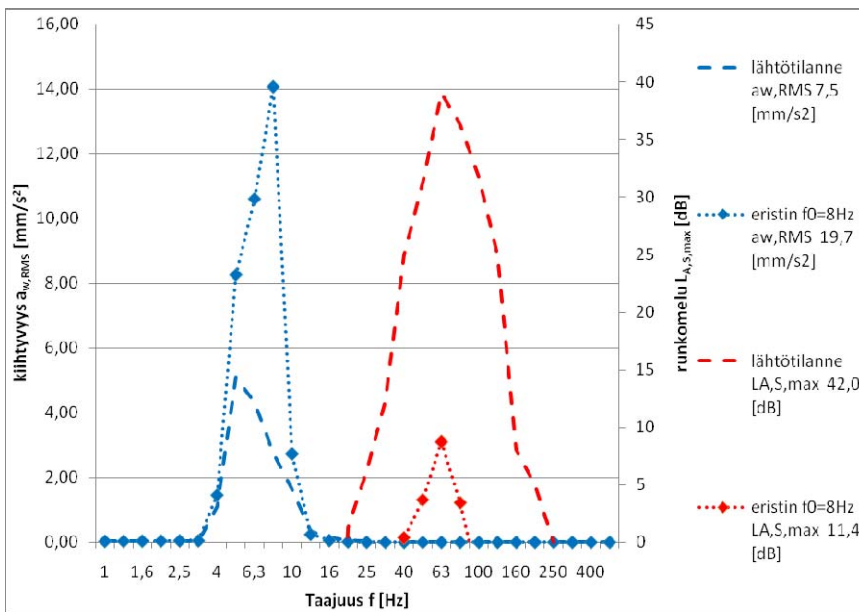
### 3.2 Rakennuksiin sijoitettavien vaimennusratkaisuiden suunnittelu

Kohteeseen sijoitettavat eristimet ovat yleensä joko eripaksuisia joustavia materiaalikerroksia, jotka asennetaan joko rakenteen koko pinnalle, kaistoina tai pisteittäin. Vaihtoehtoisesti eristäminen voidaan toteuttaa teräsjousilla. Eristimet jakavat rakennuksen kahteen osaan, eristinten alla olevaan alustaan ja eristinten päällä olevaan massaun, joita voidaan yksinkertaistettuna ajatella jousi-massajärjestelmänä. Tällöin järjestelmä voimistaa värähtelyä, joka on ominaistaajuuden ympäristössä. Ominaistaajuutta vähintään 1,4 kertaa korkeampi värähtely puolestaan vaimenee (kuva 3).

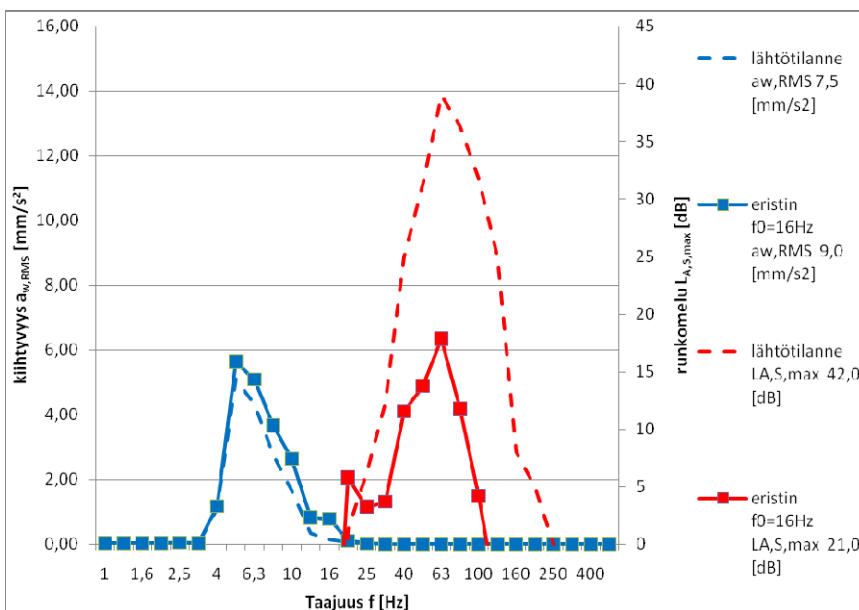


Kuva 3. Yksinkertaisen jousi-massajärjestelmän vaste kun ominaistaajuus on 8 Hz tai 16 Hz.

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty mitatut värinä- että runkomelutasot eräästä kohteesta lähtötilanteessa sekä laskennallisesti arvioituna molemmilla kuvan 3 mukaisilla eristimillä. Kohteessa lähtötilanteessa runkomelutaso  $L_{A,S,max} = 42\text{dB}$  (tavoite  $L_{A,S,max} \leq 35\text{dB}$ ) ja värinätaaso  $a_{w,RMS} = 7,5 \text{ mm/s}^2$  (tavoite  $a_{w,RMS} \leq 7,5 \text{ mm/s}^2$ ) eli runkomelu ylittää tavoitetason kun taas värinä ei lähtötilanteessa ole ongelma. Kuvasta 4 havaitaan, että eristimen ominaistajuuden ollessa 8 Hz runkomelu on vaimentunut huomattavasti ja täyttää tavoitetason mutta värinä on voimistunut eristimen ominaistajuuden ympäristössä ja se ylittää tavoitetason huomattavasti. Kun eristimen ominaistajuus on 16 Hz (kuva 5) täyttävät sekä runkomelu että värinä tavoitetasot. Vaihtoehtoisesti eristimen ominaistajuus voitaisiin mitoittaa värinän merkittävimpien taajuuksien alapuolelle esim. 3,5 Hz, jolloin sekä värinä- että runkomelutasoilla saavutettaisiin vaimennusta. Tämä johtaa kuitenkin taloudellisesti kalliimpaan vaimennusratkaisuun.



Kuva 4. Mitatut värinä- ja runkomelutasot eräässä kohteessa sekä vastaavat suureet laskennallisesti arvioituna, kun eristimen ominaistajuus on 8Hz.



Kuva 5. Mitatut värinä- ja runkomelutasot eräässä kohteessa sekä vastaavat suureet laskennallisesti arvioituna, kun eristimen ominaistajuus on 16Hz.

Eristinratkaisuja suunniteltaessa tulee lisäksi ottaa huomioon, että ratkaisulla on pystysuuntaisen ominaistajuuden lisäksi myös vaakasuuntainen ominaistajuus. Lisäksi eristinten ominaistajuuksien osuminen rungon tai lattioiden ominaistajuuksien kanssa samalle alueelle voi johtaa hallitsemattomaan yhteisvaikutukseen. Varsinaisten vaakasuuntaisten eristinratkaisuiden lisäksi tulee rakennesuunnittelussa detaljitasolla varmistua, että eristetyistä rakennuksen osasta ei ole yhtään äänisiltaa eristämättömään osaan tai maaperään. Käytännössä tämä koskee esimerkiksi kaikkia maanpaineiseiniä sekä LVIS-asennuksia, jotka tulee suunnitella tapauskohtaisesti kulloinkin kysymyksessä olevan järjestelmän vaatimusten mukaisiksi. Eristinratkaisuiden suunnittelun tulee aina perustua taajuuskaistaisiin mittaustuloksiin, jotta voidaan varmistua siitä, että tärinä- ja runkomelutasot todella pysyvät hallinnassa.

## 4. Tärinäeristysratkaisuja toteutuneissa kohteissa

### 4.1 Teräsjousin toteutettu kohde

Raideliikenteen aiheuttama tärinä- ja runkomeluriski arvioitiin maankäytön suunnitteluvaiheessa mittauksin. Tulosten perusteella runkomelutaso ylitti ja tärinätaaso alitti tavoitearvot. Eristinratkaisun suunnittelussa tärinätaasot tuli kuitenkin ottaa huomioon siten, että tärinää ei kohtuuttomasti voimistettaisi lähtötasoltaan. Kohde suunniteltiin eristettäväksi teräsjousin ja järjestelmän ominaistajudeksi mitoitettiin alhaisemmaksi kuin tärinän ja runkomelun kannalta merkitsevimmät taajuudet. Näin saavutettiin vaimennusta sekä lähtötilanteen tärinä- että runkomelutasoihin. Teräsjouselementtien asennukset on suunniteltu siten, että ne voidaan tarvittaessa vaihtaa (kuva 6).



Kuva 6. Teräsjousiin perustuvat eristinelementit asennettuna autohallin pilareiden yläpäihin. Taustalla maanpaineiseinä, joka ei tukeudu yläpuoleiseen eristettyyn rakennuksen osaan. Kuvan oikeassa reunassa näkyvässä viemäriinjassa on joustoliitin, jolla estetään äänisilta eristyksen rajalla.

## 4.2 Eristinkaistoin toteutettu kohde

Suunnitteluvaiheessa tarkistettiin maaperästä tehdyin mittauksin värinä- ja runkomelutasot kohteessa. Tulosten perusteella runkomelu ylitti, mutta värinä alitti tavoitetasot.

Eristinratkaisuiden suunnittelussa värinän kohtuutonta voimistamista tuli kuitenkin välttää.

Eristinratkaisu mitoitettiin kuvan 5 periaatetta noudattaen siten, että eristinratkaisun ominaistajuus jäi korkeammalle kuin värinän kannalta merkitsevimmät taajuudet mutta selkeästi alemmas kuin runkomelun kannalta merkitsevät taajuudet. Näin värinän kohtuuton voimistuminen vältettiin tinkimättä kuitenkin oleellisesti runkomelun vaimennuksesta.

## 4.3 Eristinkaistoin toteutettu kohde, jossa lisävaimennus stabiloinnilla

Kohteessa tehtiin ensimmäiset lyhyet arviointimittaukset kaavoitusvaiheessa. Suunnittelun käynnistyessä jo varhaisessa vaiheessa tehtiin tarvittavat tarkennusmittaukset, joiden perusteella varmistettiin suojaetäisyydet kaukaisempien rakennusten osalta sekä määritettiin eristinratkaisulta vaadittavat taajuuskaistaiset vaimennusominaisuudet. Mittaustulosten perusteella sekä värinä että runkomelu ylittivät tavoitetasot. Koska rautatietä lähimpien rakennusten ja radan väliin oltiin rakentamassa uutta liikenneväylää, jonka osalta maaperä tultiin stabiloimaan, päätettiin normaalia stabilointirakennetta muuttaa siten, että sillä saavutettiin vaimennusta värinätasoihin myös rakennusten osalta. Stabiloinnilla saatava lisävaimennus mahdollisti kohteen toteuttamisen taloudellisesti halvemmallalla eristinratkaisulla. Eristinratkaisu mitoitettiin ottamalla huomioon värinän ja runkomelun kannalta merkitsevimmät taajuudet, jolloin suunnitteluratkaisu noudatti kuvassa 5 esitettyä periaatetta. Lopulliseksi eristinmateriaaliksi valittiin Sylomer (kuva 7), jonka materiaaliominaisuudet mahdollistivat vaaditun runkomeluvaimennuksen saavuttamisen.

Hankkeen yhteydessä olemme käynnistäneet tutkimusprojektin yhteistyössä

Ratahallintokeskuksen, NCC Rakennus Oy:n ja YIT Rakennus Oy:n kanssa. Tavoitteena on selvittää stabilointirakenteen vaikutus kohteessa sekä eristinratkaisulla saavutettava vaimennus kohteessa.



Kuva 7. Kuvassa näkyvät eriväriset Sylomer-eristimet on valittu niille tulevan kuormituksen mukaan.



#### 4.4 Huone huoneessa –ratkaisulla eristetty kohde

Kohteen tärinä- ja runkomelutasot arvioitiin laskennallisesti kaavoitusvaiheessa ja suunnitteluvaiheessa arviointia tarkennettiin maaperästä tehdyin mittauksin. Mittaustulokset tukivat aiempaa arviota, jonka perusteella tärinä alitti, mutta runkomelu osittain ylitti tavoitetasot. Tässä tapauksessa ei ollut vaaraa tärinän liiallisesta voimistumisesta rakenteissa tai mahdollisten eristusratkaisujen seurauksena. Ilman taajuuskaistaisia mittaustuloksia ei kohteessa tarvittavia vaimennusratkaisuja kuitenkaan pystyttäisi suunnittelemaan luotettavasti. Kohteessa rakennusmassa on kohtisuoraan metrorataa vasten ja rataa lähimmässä osassa rakennusta tilojen eri käyttötarkoituksista johtuen sovelletaan erilaisia runkomelutasovaatimuksia.

Teknistaloudellisesti paras ratkaisu oli suojata kriittiset huonetilat runkomelua vastaan tekemällä huoneisiin kaksinkertaiset rakenteet eli ns. huone huoneessa –ratkaisu. Tällöin käytännössä tilan lattia-, katto- ja seinärakenteet on irrotettu rakennuksen rungosta eristimiä käyttäen.

### 5. Kaavoituksen ja suunnittelun ongelmia

Kappaleessa 3.2 esitettiin miten runkomelun vaimennukseen tarkoitettu väärin mitoitettu eristusratkaisu voi johtaa tärinähaitan kasvattamiseen. Esimerkissä tarkasteltiin vain järjestelmän pystysuuntaista ominaistaajuutta mutta mitoituksessa tulisi aina ottaa huomioon, että järjestelmällä on vaste myös vaakasuuntiin. Jotta vaakasuuntainen värähtely voidaan suunnittelussa huomioida, tulee mitoituksen lähtötietoina olla käytettävissä myös vaakasuuntiin saadut mittaustulokset kohteesta. Usein kuitenkin nämä suunnat on jätetty selvityksissä ottamatta huomioon, mikä saattaa johtaa mahdollisen haitan arvioinnissa väärin loppupäätelmiin, koska vaakasuuntaisten komponenttien osuus voi usein olla merkitsevämpi kuin pystysuuntaisten [8], [11].

Toisinaan kohteiden tärinä- ja runkomeluriskiä on arvioitu vain maaperän, liikennöivän kaluston ja kohteen ominaisuuksien perusteella. Kaavoitustasolla on ollut havaittavissa, että usein vain tärinä huomioidaan mahdollisena haittana, jolloin on tehty väärin johtopäätöksiä maaperän perusteella. Näin on käynyt esimerkiksi maa-alueilla, joilla peruskallio on lähellä maanpintaa ja rata sekä rakennukset perustetaan kallion varaan. Tällöin on arvioitu tärinärisi olemattomaksi kovasta maaperästä johtuen ja sivuutettu nimenomaan kovilla maaperillä esiintyvä runkomeluhaitta kokonaan [12].

Muutamassa kohteessa maa-alueiden käytön suunnittelun yhteydessä on suoritettu riittävän laajat mittaukset sekä tulosten analysointi niin tärinän kuin runkomelunkin osalta mutta tulosten on sellaisenaan tulkittu soveltuvan saman rataosuuden varressa sijaitseville maa-alueille saman kunnan alueella. Tällöin jäävät huomioimatta muutokset maaperässä, jotka vaikuttavat merkitsevästi maaperässä etenevän värähtelyn voimakkuuteen sekä taajuussisältöön.

Kaavamääräyksiin on myös päätynyt vaatimuksia tärinähaitan ehkäisemisestä rajoittamalla rakenteiden alimpia sallittuja ominaistaajuuksia. Tällöin kaavoitusvaiheen selvityksiä tehnyt konsultti on päätynyt esittämään teoriassa toimivaa ratkaisua, jota ei kuitenkaan käytännössä ole ollut mahdollista toteuttaa, koska vaaditut ominaistaajuudet on määritelty liian alhaiseksi.

## 6. Yhteenveto

Viime aikoina julkaistut ohjeet mahdollistavat tärinä- ja runkomeluhaitan arvioinnin eri tarkkuustasoilla kulloisestakin tavoitteesta riippuen. Huolimatta olemassa olevista menetelmistä ja tavoitetasoista käytännöt vaihtelevat kunnittain huomattavasti. Toisinaan on ollut havaittavissa myös virhekäsityksiä sekä vääränlaisia tulkintoja. Tarkimman luokan selvityksissä eli mittauksissa tulee aina ottaa huomioon pystysuuntaisen komponentin lisäksi myös vaakasuuntaiset komponentit. Maaperästä tehtävien mittausten tulosten tulkinnassa tulee aina ottaa huomioon myös värähtelyn voimistuminen rakenteissa resonanssi-ilmion seurauksena.

Vaikka tärinä- ja runkomeluriskiä voidaan arvioida esimerkiksi kaavoitusvaiheessa turvaetäisyyksien ja laskentamallien avulla, tulee vaimennusratkaisuiden suunnittelun aina perustua kohteessa tehtyihin mittaustuloksiin, koska vain mittaustuloksista saadaan riittävän tarkat taajuuskaistaiset tiedot suunnittelun lähtökohdaksi. Jos vaimennusratkaisu perustuu rakennuksen irrottamiseen maaperästä joustavan kerroksen avulla, järjestelmän vaste on määritettävä pystysuunnan lisäksi myös vaakasuunnissa.

## Lähdeluettelo

- [1] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B3. Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista. 2004. Helsinki, ympäristöministeriö.
- [2] Ympäristönsuojelulaki. Suomen säädöskokoelma, nro 86/2000.
- [3] Maankäyttö- ja rakennuslaki. Suomen säädöskokoelma, nro 132/1999.
- [4] Maankäyttö- ja rakennusasetus. Suomen säädöskokoelma, nro 895/1999.
- [5] Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta. Suomen säädöskokoelma, nro 737/1994.
- [6] Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT tiedotteita 2278. 50+15 s.
- [7] Törnqvist, J. ja Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50. 46+33 s.
- [8] Talja, A. Vepsä, A. Kurkela, J. ja Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. VTT tiedotteita 2425. 95+69 s.
- [9] ISO 2631-2. 2003. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). International Organisation for Standardization.
- [10] NS 8176.E. 1999. Vibration and Shock – Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings. Byggstandardiseringsråd.
- [11] Huhtala, T. 2006. Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun raideliikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan arvioinnissa. 105+29 s.
- [12] Talja, A. ja Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Esiselvitys, VTT tiedotteita 2468. 56+11 s.
- [13] Federal Railroad Administration. U.S, Department of Transportation. 2005. Report HMMH No. 2936304. Highspeed ground transportation. Noise and vibration impact assessment.
- [14] Federal Transit Administration. U.S, Department of Transportation, Office of Planning and Environment. 2006. Report FTAVA90100306. Transit noise and vibration impact assessment.
- [15] Peltonen, T. Backholm, M. ja Lahti, T. 2005. Raideliikenteen melu- ja tärinä tutkimuksia. Akustiikkapäivät 2005, 26.-27.2005, Kuopio, 135-140.
- [16] Huhtala, T. ja Helimäki, H. 2009. Raideliikenteen Tärinä- ja runkomeluselvityksiä sekä vaimennusratkaisuja. Akustiikkapäivät 2009, 14.-15.5.2009, Vaasa, 80-85.

## **9. Rakennusfysiikan opetus**



# Uuden rakennusfysiikan käsikirjan toteutus

Juha Vinha

Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos käynnistivät v. 2008 uuden rakennusfysiikan käsikirjan toteutuksen. RIL toimii kirjan julkaisijana ja TTY:n Rakennustekniikan laitos päätoimittajana. Aikaisempi RIL:n käsikirja tältä aihealueelta on julkaistu jo v. 1984, joten kirjan ajanmukaistamiselle on suuri tarve. Projektin tavoitteena on aikaansaada kattava ja ajan tasalla oleva rakennusfysiikan käsikirja, joka käsittelee mm. rakennusfysiikan teoriaa, rakennuksen sisä- ja ulkoympäristön olosuhteita, rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä suunnittelua ja toimintaa sekä rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Kirjan teoreettisen tason ja sisällön on tarkoitus täyttää sekä rakennusfysiikan AA-vaativuusluokan että A-vaativuusluokan suunnittelupätevyyden tarpeet.

## 1. Johdanto

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL on julkaissut vuonna 1984 kirjan RIL 155-1984 Lämmön- ja kosteudeneristys [1]. Monelta osin käsi- ja oppikirjana toimivan kirjan sisältö on vanhentunut. Vastaavaa laajaa ja seikkaperäistä suomenkielistä kirjaa ei markkinoilla ole, joten uusi korvaava kirja on tarpeen. Myös ulkomaisia rakennusfysiikan käsikirjoja on verrattain vähän saatavilla. Esimerkkeinä näistä voidaan mainita seuraavat kirjat [2; 3; 4].

Rakennusfysikaalisten ilmiöiden tuntemisessa ja niiden hallitsemisessa käytännön rakentamisessa esiintyy vielä paljon puutteita. Rakennusfysiikka on laaja alue, jolla on suuri vaikutus rakennusten terveellisyyteen ja viihtyvyyteen. Syvällinen ja kattava julkaisu on tarpeen alan tietotason ja koulutuksen sekä sitä kautta rakentamisen laadun kehittämiseksi.

Rakennusfysiikan alueella on tehty parin viime vuosikymmenen aikana suuri määrä tutkimusta eri puolilla maailmaa. On julkaistu myös paljon EU-standardeja, jotka tulee ottaa huomioon yhä laajenevassa määrin. Tutkimusten tuloksia ja standardien vaatimuksia on myös tarpeellista saattaa tiivistetysti käsi- ja oppikirjan muotoon.

Edellä mainituista syistä johtuen Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos käynnistivät v. 2008 uuden rakennusfysiikan käsikirjan toteutuksen. RIL toimii kirjan julkaisijana ja TTY:n Rakennustekniikan laitos päätoimittajana. Kirjan toteutusta tukee suuri joukko rakennusalan yrityksiä ja yhdistyksiä, mikä osaltaan kertoo kiinnostuksesta ja tarpeesta saada aikaan uusi käsikirja tälle aihealueelle.

## 2. Käsikirjan tavoitteet ja kohderyhmät

Projektin tavoitteena on aikaansaada kattava ja ajan tasalla oleva rakennusfysiikan käsikirja, joka käsittelee mm. rakennusfysiikan teoriaa, rakennuksen sisä- ja ulkoympäristön olosuhteita,

rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä suunnittelua ja toimintaa sekä rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Kirja keskittyy lämmön, ilman ja kosteuden vaikutusten tarkasteluun rakennuksissa ja rakenteissa. Akustiikka, palotekniikka, ilmanvaihtotekniikka ja valaistus jätetään kirjassa vähemmälle huomiolle. Sisältö suunnitellaan siten, että kirja toimii sekä oppikirjana korkeakouluissa (yliopistot, ammattikorkeakoulut) että suunnittelijoiden, rakentajien ja valvojien tietolähteenä ja ohjeena toteutettaessa terveellisiä, turvallisia ja viihtyisiä rakennuksia ja tiloja.

Koska rakennusfysiikka on suhteellisen uusi tutkimusalue, alan termistöt ja käsitteet sekä suureet ja niiden merkintätavat vaihtelevat laajasti eri julkaisuissa. Käsitteiden ja merkintöjen yhtenäistäminen on tärkeä osatavoite kirjan toteutustyössä. Tärkeä asia on myös rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisten ominaisuuksien kerääminen ja taulukointi niin, että niistä löytyy jatkossa kattavat tiedot samasta paikasta.

Kirjan teoreettinen tason ja sisällön on tarkoitus vastata rakennusfysiikan AA-vaativuusluokan suunnittelun pätevyyden tasoa. Kirja täyttää myös A-vaativuusluokan pätevyyden tarpeet. Kirjaa voidaan käyttää myös täydennyskoulutuksessa.

Käsikirja on tarkoitettu kaikille rakennusalan ammattilaisille rakennusfysiikan perusteokseksi, kuten esim.

- opettajille ja opiskelijoille
- suunnittelijoille
- urakoitsijoille
- rakennuttajille ja valvojille
- materiaaliteollisuudessa työskenteleville
- viranomaisille

### **3. Työn suoritus ja organisaatio**

Laadittavan kirjan päätoimittajana toimii Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos. Kirjan toimitustyö sisältää myös tutkimus- ja asiantuntijatyötä. Kirjan kirjoittajat ovat myös pääosin TTY:n Rakennustekniikan laitokselta. Muut kirjoittajat valitaan sisältösuunnitelman perusteella ja he ovat alan tutkijoita, suunnittelijoita tai muita alan asiantuntijoita. Kirjan toteutusta varten on muodostettu lisäksi toimituskunta ja johtoryhmä.

Hankkeessa mukana olevien yritysten ja yhdistysten edustajat, RILin rakennusfysiikan toimikunnan jäsenet sekä muut alan asiantuntijat (esim. kokeneet rakennesuunnittelijat) ottavat kantaa käsikirjan sisältöön lausuntokierroksien aikana.

Käsikirjan toteutus alkoi v. 2008 ja tavoitteena on saada se valmiiksi v. 2010 lopussa.

### **4. Sisältösuunnitelma**

Käsikirjan sisältö on esitetty lyhyesti seuraavassa päälukujen mukaisten otsakkeiden yhteydessä:

#### **4.1 Johdanto**

Johdannossa käydään läpi kirjan tausta, rakenne ja rajaukset.

## 4.2 Rakennusfysikaalinen suunnittelu

Rakennusfysikaalista suunnittelua käsittelevässä luvussa käydään läpi suunnitteluun liittyviä osatekijöitä ja suunnitteluperiaatteita yleisellä tasolla. Luvussa tarkastellaan mm. seuraavia asioita:

- Rakennusfysiikan osa-alueet
- Suunnittelijan tehtävät
- Rakennusfysikaalisen suunnittelun periaatteet
  - Lämpötekniinen suunnittelu
  - Kosteustekniinen suunnittelu
  - Vaipan ilmatiivyyden suunnittelu ja ilmavirtausten rajoittaminen vaipparakenteissa
- Rakenteen toimintakriteerit ja olosuhteiden raja-arvot
- Rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut ja laskentaohjelmat

Laskentaohjelmien käyttö rakennusfysikaalisessa suunnittelussa lisääntyy koko ajan, joten tähän liittyviä asioita käsitellään luvussa aiempaa enemmän. Myös rakenteiden toimintakriteerien ja olosuhteiden raja-arvojen tarkempia määrittelyjä tarvitaan laskennallisissa tarkasteluissa.

## 4.3 Rakennuksen sisä- ja ulkoympäristö

Rakennuksen sisä- ja ulkoympäristöä käsittelevässä luvussa tarkastellaan olosuhteita ja rasituksia, joita rakennuksille ja rakenteille kohdistuu. Keskeiset asiat tässä luvussa ovat:

- Kostean ilman teoria
- Ulkoilman olosuhteet
- Sisäilman olosuhteet
- Ilmanvaihdon periaatteet
- Maaperän olosuhteet

Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen kannalta on tärkeää, että rakennuksia ja rakenteita tarkastellaan kriittisissä ulkoilman olosuhteissa. Laskentaa varten tarvitaan erilaisia ulkoilman referenssivuosia, jotka ovat kriittisiä tarkasteltavan ilmiön kannalta. Tältä osin tarvitaan myös uutta tutkimustietoa.

## 4.4 Lämpö ja lämmön siirtyminen

Luvussa 4 käydään läpi lämmönsiirron teoria. Keskeiset asiat ovat:

- Lämpö
- Lämmön siirtymismuodot
- Johtuminen
  - Lämmön johtuminen aineessa
  - Materiaalien lämmönjohtavuus
  - Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot
  - Rakennusosien U-arvon laskenta
  - Putkien ja kanaalien lämmöneristys
  - Rakennuksen routasuojaus
  - Epästationäärinen lämmön johtuminen
- Lämmön konvektio
  - Pakotettu ja luonnollinen konvektio
  - Konvektio materiaalin pinnalla

- Konvektio ilmapölyssä
- Konvektio raon tai reiän läpi
- Konvektio huokoisen materiaalin läpi
- Rakenteen sisäinen konvektio
- Säteily
  - Pitkä- ja lyhytaaltainen säteily
  - Pinnan säteilyteho
  - Säteilyn intensiteetti
  - Säteilyn vaikutus pinnan lämpötilaan
  - Pintojen välinen säteily
  - Ikkunan läpi siirtyvä säteily
- Yhdistetty lämmönsiirto ja lämmönsiirron kokonaistase

#### 4.5 Ilma ja ilman virtaus

Luvussa 5 tarkastellaan ilman paine-erojen muodostumista rakenteiden yli ja ilman virtausta rakenteissa. Tarkasteltavia asioita ovat:

- Ilman paine-erot
  - Hydrostaattinen paine-ero
  - Tuulen aiheuttama paine-ero
  - Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero
  - Vaipan yli vallitsevan kokonaispaine-eron laskenta
- Ilman virtaus raon tai reiän läpi
- Ilman virtaus huokoisen materiaalin läpi
  - Materiaalien ilmanläpäisevyys
- Rakennusvaipan ilmanpitävyys
- Ulkovaipan sallitut sisäpinnan lämpötilat

#### 4.6 Kosteus ja kosteuden siirtyminen

Luvussa 6 käydään läpi materiaalien kosteuspitoisuuden liittyvät asiat sekä rakenteiden kosteuden siirron teoria. Tässä luvussa käydään läpi seuraavat asiat:

- Materiaalin kosteuspitoisuus
  - Kosteuden sitoutumismekanismit
  - Hygroσκοoppinen tasapainokosteus
  - Kapillaarinen tasapainokosteus
- Kosteuden siirtymismuodot
- Diffuusio
  - Vesihöyryn diffuusio huokoisessa materiaalissa
  - Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys
  - Vesihöyryn siirtyminen materiaalien välillä suljetussa tilassa
  - Rakenteiden diffuusiotarkastelut stationääritilassa
  - Epästationäärisiä vesihöyryn diffuusio
- Pintadiffuusio
- Kapillaarivirtaus
  - Veden nousu kapillaariputkessa
  - Kapillaarivirtaus yleisessä tapauksessa
  - Materiaalien ja maalajien kapillaariset ominaisuudet
  - Kosteuden siirtyminen kapillaarisesti materiaalien välillä



- Materiaalin ja rakenteen kuivuminen
- Kosteuden konvektio
  - Konvektio ilmvälissä
  - Konvektio raon tai reiän läpi
  - Konvektio huokoisen materiaalin läpi
  - Rakenteen sisäinen konvektio
- Painovoimainen veden siirtyminen
- Paineenalainen veden siirtyminen
- Yhdistetty kosteuden siirto ja kosteuden siirron kokonaistase

Lämpöä, ilmaa ja kosteutta käsittelevissä luvuissa 4, 5 ja 6 esitetään laskuesimerkkejä, joilla sovelletaan teoretietoa käytäntöön. Laskuesimerkit sijaitsevat ko. kohdassa teoretiedon yhteydessä. Kustakin aihepiiristä A- ja AA-luokan teoriaosuus löytyvät peräkkäin samasta kohdasta. AA-luokan teoriaosuus voidaan tarvittaessa merkitä näkyviin jollakin sopivalla tavalla.

#### 4.7 Rakennusten energiatehokkuus

Rakennusten energiatehokkuutta käsittelevässä luvussa tarkastellaan seuraavia asioita:

- Rakennusten energiankulutus
- Rakennusten energiataloudellisten valintojen pääperiaatteet
- Rakennusten energiatehokkuuden parantamiskeinot ja niiden taloudellinen valinta
- Rakennusosien energiatekninen toiminta
- Erikoisratkaisujen energiatekninen toiminta
- Asukkaiden käyttötottumusten vaikutus energiankulutukseen

Luvussa kuvataan eri tekijöiden merkitystä ja vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen koko rakennuksen tasolla ja yksittäisissä rakennusosissa. Koko rakennusta koskevissa tarkasteluissa otetaan huomioon kaikki energiankulutukseen vaikuttavat keskeiset osatekijät kuten lämmitystavat, ilmanvaihto ja käyttöveden lämmitys yleisellä tasolla. Tarvittavissa kohdissa energiankulutusta havainnollistetaan laskuesimerkeillä ja taulukoilla.

#### 4.8 Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet

Luvussa 8 esitellään lyhyesti eri rakennusmateriaalien ja -tuotteiden käyttötarkoitus, asennustavat, tavallisimmat tuotetyypit ja niiden ominaisuudet karkealla tasolla. Tarkasteltavat materiaalityypit ovat:

- Katemateriaalit
- Aluskatteet
- Vedeneristeet
- Höyrynsulut
- Ilmansulut
- Tuulensuojat
- Lämmöneristeet
- Runkoaineet
- Sisälevyt
- Rappaukset ja tasoitteet
- Maalit, lakat ja pohjusteet
- Saumanauhat, tiivistysmassat ja kitit

- Ikkunat
- Ovet
- Erikoismateriaalit

Materiaalien kuvauksia varten kerätään informaatiota sekä kirjallisuudesta että materiaali valmistajilta. Tarkemmat rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet esitetään käsikirjan liitteissä olevissa taulukoissa.

#### **4.9 Rakeneratkaisujen rakennusfysikaalinen toiminta**

Luvussa 9 käydään läpi erilaisten rakenteiden suunnittelua ja toteutusta rakennusfysikaaliselta kannalta katsottuna. Tarkasteltavia asioita ovat:

- Yleiset suunnitteluperiaatteet
- Yläpohjat ja vesikatot
- Välipohjat
- Ulkoseinät
- Alapohjat ja maanvastaiset rakenteet
- Märkätilojen rakenteet
- Ikkunat ja ovet
- Erikoistilojen rakenteet
- Rakennusaikainen kosteuden hallinta

Luvussa kuvataan tavanomaisimpien rakenneratkaisujen lisäksi niiden toteutustavat ja perustellaan rakenneratkaisut rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta. Luvussa kuvataan myös tyypilliset rakennusvirheet ja vauriomekanismien syntyvät. Tarpeen vaatiessa otetaan huomioon myös mm. ilmanvaihdon ja akustiikan asettamat vaatimukset. Tarvittavissa kohdissa rakenteiden toimintaa havainnollistetaan laskuesimerkeillä ja taulukoilla.

#### **4.10 Rakennusfysikaaliset mittaukset ja kuntotutkimukset**

Rakennusfysikaalisia mittauksia ja kuntotutkimuksia käsittelevässä luvussa käsitellään seuraavia asioita:

- Rakennusfysikaalisten suureiden mittaukset
- Materiaaliominaisuuksien mittaukset
- Rakenteiden mittaukset
- Rakennusten mittaukset
- Rakennusten kuntotutkimukset

Mittausmenetelmien yhteydessä mainitaan myös niihin liittyvät EN- ISO- ja SFS-standardit. Kattavat listat rakennusfysiikkaan liittyvistä eurooppalaisista testaus- ja laskentastandardeista esitetään käsikirjan liitteissä.

## 5. Yhteenveto

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on parhaillaan käynnissä uuden rakennusfysiikan käsikirjan toteutustyö. Käsikirjan pääluvut ovat:

1. Johdanto
2. Rakennusfysikaalinen suunnittelu
3. Rakennuksen sisä- ja ulkoympäristö
4. Lämpö ja lämmön siirtyminen
5. Ilma ja ilman virtaus
6. Kosteus ja kosteuden siirtyminen
7. Rakennuksen energiatehokkuus
8. Rakennusmateriaalien ja tuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet
9. Rakennusratkaisujen rakennusfysikaalinen toiminta
10. Rakennusfysikaaliset mittaukset ja kuntotutkimukset

Kirjan teoreettinen tason ja sisällön on tarkoitus vastata rakennusfysiikan AA-vaativuusluokan suunnittelun pätevyyden tasoa. Kirja täyttää myös A-vaativuusluokan pätevyyden tarpeet. Kirjaa voidaan käyttää myös täydennyskoulutuksessa. Käsikirjan toteutus alkoi v. 2008 ja tavoitteena on saada se valmiiksi v. 2010 lopussa.

## Lähdeluettelo

- [1] RIL 155. 1984. Lämmön- ja kosteudeneristys. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 389 s.
- [2] Nevander, L.E. & Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok, Praktik och teori. 2nd ed. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 p.
- [3] Hagentoft, C.-E. 2001. Introduction to Building Physics. Lund, Studentlitteratur. 422 p.
- [4] Hens, H. 2007. Building Physics – Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. Ernst & Sohn. 270 p.



## **10. Rakennusten ilmanpitävyys**



## Rakennusten ilmanpitävyys ja energiatehokkuus

Timo Kauppinen<sup>1</sup>, Ilpo Kouhia<sup>1</sup>, Keijo Kovanen<sup>1</sup>, Tuomo Ojanen<sup>1</sup>, Jarmo Laamanen<sup>1</sup>,  
Tapani Mäkikyrö<sup>2</sup>, Pekka Seppälä<sup>2</sup> ja Erkki Vähäsöyrinki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> VTT

<sup>2</sup> Oulun kaupungin rakennusvalvontavirasto

### Tiivistelmä

Energiatehokkuuslaskelmamääräysten tullessa voimaan rakennusalan eri osapuolten kiinnostus rakennusten tiiviiden mittaamiseen kasvoi voimakkaasti. Olennainen asia rakennusten ilmanpitävyydessä on, että asetetaan tavoitetaso, ja suunnittelu- ja toteutusvaiheen toimenpitein se toteutetaan. Tämä edellyttää työmaan asianmukaista ohjeistamista sekä myös suunnitteludetaljien kehittämistä. Tähänastisten tulosten perusteella näyttää siltä, että ns. tavanomaisia menetelmiä käyttämällä, mutta kiinnittämällä erityistä huomiota ilmanpitävyyteen vaikuttaviin asioihin voidaan saavuttaa hyväksi katsottava tiiviystaso, pientaloissa  $n_{50} < 1,0$  l/h. Koska uudistuotanto on vain 1 – 2 % rakennuskannasta, todellinen ongelma on olemassa olevassa rakennuksissa, joiden tiiveyden parantamiseen tuleekin kiinnittää erityisesti huomiota, koska energiatehokkuuden alenemisen lisäksi ilmapuodot voivat aiheuttaa terveyshaittoja ja rakenneauriota. Rakennusten ilmanpitävyys liittyy olennaisesti myös ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuteen. Rakennuksen tiiviyttä ei siten pidä käsittää vain yksittäisenä, parannusta kaipaavana kohtana. Tässä esitelmässä esitetään VTT:n 2008 - 2009 eri kohteista mittaamia tuloksia ja tarkastellaan niistä saatuja kokemuksia.

### 1. Johdanto

Suomessa ei ole ollut aikaisemmin määräyksiä rakennusten ilmanpitävyydestä, mutta energiatehokkuuslaskelman ilmapuotoluvun oletusarvo  $n_{50} = 4$  l/h (vaihtoa tunnissa) aiheutti uudistuotannon ilmanpitävyyden mittausaallon, joka on synnyttänyt myös uutta palveluliiketoimintaa. Samalla pientalovalmistajat ja rakennusyrietykset ovat parantaneet uudistuotannon laadunvarmistusmenettelyään kehittämällä toimintatapoja, joilla ilmanpitävyyden asianmukainen taso yritetään varmistaa. Kahden viime vuoden aikana tehtyjen mittausten perusteella näyttääkin siltä, että uudistuotannon ilmanpitävyys on merkittävästi lähtenyt paranemaan, tosin laajaa aineistoa ilmanpitävyydestä ei ole käytettävissä. Myönteinen asia on, että rakennusalan eri osapuolet asettavat tavoitteet, jotka pyritään saavuttamaan ja pitämään. Rakennusten ilmanpitävyyttä on mitattu Suomessa n. 30 vuoden ajan, mutta vasta viranomaismääräysten muuttuminen aiheutti tiiviysmittausten läpimurron ja laajemman huomion asiaan.

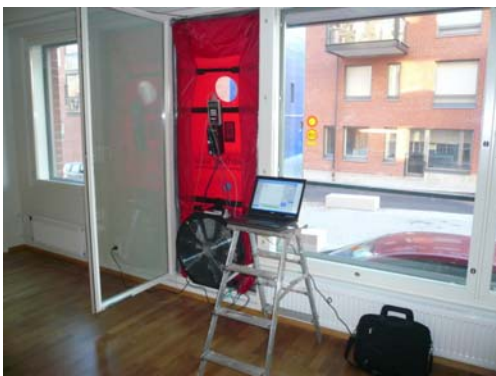
Olennainen asia rakennusten ilmanpitävyydessä siis on, että asetetaan tavoitetaso, ja suunnittelu- ja toteutusvaiheen toimenpiteillä se toteutetaan. Tavoitetaso saavutetaan työmaan asianmukaisella ohjeistamisella, suunnitteludetaljien kehittämällä sekä myös entisestä käytännöstä poikkeavilla ratkaisuilla. Suunnitteluvaiheessa määritetään nykyistä yksityiskohtaisemmin ne ulkovaipan tiiveyteen vaikuttavat rakenneosat ja rakennedetaljit, joiden toteuttaminen ohjeistetaan työmaalle. Lopullinen ulkovaipan toimivuus riippuu siitä, miten työmaalla kyseiset asiat tehdään.

Käytettävissä olevien tulosten perusteella näyttää siltä, että ns. tavanomaisia menetelmiä käyttämällä, mutta kiinnittämällä erityistä huomiota ilmanpitävyyteen vaikuttaviin asioihin voidaan saavuttaa hyväksi katsottava tiiviystaso, pientaloissa  $n_{50} < 1,0$  l/h ja kerrostaloissa taso 0,5 l/h.

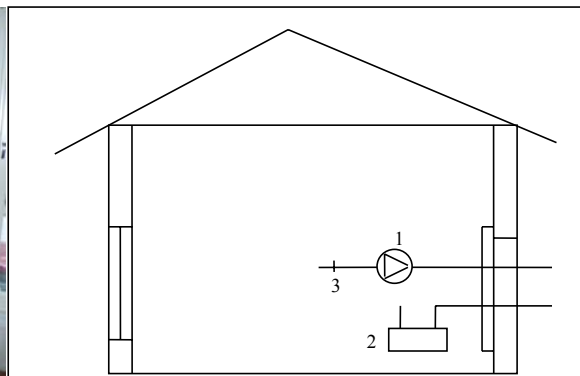
Uudistuotannon laadunvarmistamisessa esillä ollut kysymys on, miten paljon esim. valmistuvasta kerrostalotuotannosta tai pientalotuotannosta pitäisi mitata? Periaatteessahan jokainen talo tai asunto on yksittäinen kohde. Käytännössä mittaaminen täytyy rajoittaa tietynsuuruiseen otokseen ainakin kerrostalojen osalta, ellei kehitetä sitten koko rakennuksen tiiviysmittausmenetelmiä. Miten suuren rakennuksen ilmanpitävyys tulisi mitata? Pian julkaistava ”Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje” [1] vastaa näihin kysymyksiin. Toinen esiin tullut seikka on mittaustarkkuus. Jokainen mitattu tulos sisältää mittausvirheen, ja tuloksissa ei yleensä esitetä virherajoja. Mikäli kohde on pienehkö ja tiivis, voi mittalaitteiden tuloksissa esiintyä mittalaitteesta johtuvaa virhettä. Mikäli esimerkiksi pientalon ilmanpitävyys  $n_{50} < 0,5$  l/h (passiivitalon edellytykset täyttävä), ei ole mitään mieltä lähteä kilpailemaan desimaaleilla, varsinkin jos mittaustuloksiin liittyy epävarmuustekijöitä.

Ilmavuotoluku on yksikäsitteinen suhteellisen yksinkertaisesti mitattavissa oleva suure, jonka avulla rakennuksia voidaan verrata keskenään. Se ei kuitenkaan selitä täysin rakennusten vuotoilmanvaihdosta johtuvaa ylimääräistä energiankulutusta, koska joidenkin rakennusten ilmavuotokäyrät ns. normaalisti esiintyvien paine-erojen alueella (0 – 10...15 Pa) saattavat poiketa toisistaan, vaikka ilmavuotoluvut  $n_{50}$  olisivatkin samat. Ilmanpitävyyden mittaus- ja tulkintamenetelmissä on siten vielä kehittämisen varaa. Lisäksi täytyy korostaa sitä, että ilmanpitävyys on vain yksi energiantehokkuuteen vaikuttava tekijä. Rakennuksen vaipan, taloteknisten järjestelmien, sääolosuhteiden ja käytön yhteisvaikutus ja järjestelmien yhteen sovittaminen määrää lopulta rakennuksen toimivuuden.

Rakennusten ilmanpitävyyttä on mitattu Suomessa jo 70 - 80-lukujen vaihteesta lähtien. Rakennuksen ilmanpitävyys voidaan mitata erityisellä laitteistolla (esim. Blower-door). Tiiviysmittauksessa tutkittavan rakennuksen tai rakennuksen osan ja ulkoilman välille asetetaan 50 Pa ali- ja ylipaine, ja mitataan tämän paine-eron ylläpitämiseksi tarvittava ilmavirta. Paine-ero aiheutetaan puhaltimella (kuvat 1. ja 2.).



Kuva 1. Paineekokeen periaate.



Kuva 2. Mittausjärjestelyt. 1) säädettävä apupuhallin 2) ulko- ja sisäilman paine-eron mittaus 3) tilavuusvirran mittaus.



Ilmavuotokäyrän yhtälö on

$$q = C\Delta p^n, \quad (1)$$

jossa  $q$  = vuotoilmavirta  
 $C$  = vuotokerroin  
 $\Delta p$  = paine-ero rakennuksen vaipan yli  
 $n$  = eksponentti.

Eksponentin  $n$  = arvona esitetään yleisesti 0,65. Ilmavuotoluku  $n_{50} = q_{50}/V$ , jossa  $q_{50}$  on vuotoilmavirta 50 Pa paine-erolla ja  $V$  on kohteen tilavuus. Rakennuksen ilmanpitävyyden mittaaminen painekoemenetelmällä on esitetty standardissa SFS-EN 13829 [2]. Standardissa esitetään painekokeen suorittaminen sekä alipaine- että ylipainemenetelmällä. Ilmavuotoluvun arvo  $n_{50}$  on ali- ja ylipainekokeiden tulosten keskiarvo. Ilmavuotokäyrä tulee määrittää vähintään 10 Pa välein. Ilmavuotoluku voidaan määrittää myös vaippapinta-alaa kohti tai määrittää se sekä tilavuuteen että ulkovaipan pinta-alaan verrattuna, kuten useissa muissa maissa tehdään. Yhdysvalloissa ja Kanadassa määritellään ilmavuotoluku myös laskennallisena vuotopinta-alana (ELA = Equivalent Leakage Area) 4 Pa:n ja 10 Pa:n paine-eroilla

## 2. Rakennusten ilmanpitävyys ja energiatehokkuuslaskelmat

Viitteen [1] mukaisesti vuotoilma vaikuttaa merkittävästi rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Pientaloissa laskennallinen kokonaisenergiankulutuksen lisäys on keskimäärin 4 % (vaihteluväli 2–7 %) jokaista  $n_{50}$ -luvun kokonaisuusyksikön lisäystä kohti. Kokonaisenergiankulutus on tyypillisessä pientalossa ( $n_{50} = 4,0$  l/h) 6–20 % suurempi kuin erinomaisen ilmanpitävyydestä ( $n_{50} \leq 1,0$  l/h) omaavassa pientalossa [1]. Tällä hetkellä vertailulämpöviön laskennassa käytetään rakennuksen ilmavuotoluvun vertailuarvona arvoa 4,0 l/h. Vuoden 2010 rakentamismääräyksissä ilmavuotoluvun vertailuarvona tullaan käyttämään arvoa 2,0 l/h. Pienempää ilmavuotolukua voidaan käyttää, jos on mitattu tai muulla tavoin osoitettu.

Rakennusten tiiviysmittaus tulisi katsoa osaksi toimivuuden varmistamista (ToVa), jolloin rakennusten ilmanpitävyyteen vaikuttavat asiat tulee ottaa nykyistä paremmin huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Jotkut yritykset ovatkin aloittaneet kehitystyön, jossa luodaan suunnittelu- ja toteutusvaiheen kattava menettely, esimerkkinä kosteudenhallintasuunnitelmaan verrattava energianhallintasuunnitelma.

Eri yhteyksissä on keskusteltu siitä, onko rakennus liian tiivis. Tämä kysymys palautuu ilmanvaihtojärjestelmän puutteisiin. Rakenteita tiivistämällä mutta jättämällä ilmanvaihto ennalleen (esim. painovoimainen ilmanvaihto) on heikennetty ilmanvaihdon toimintaedellytyksiä. Jos kohteessa on ollut koneellinen poistoilmavaihto, rakenteiden tiivistäminen on kasvattanut alipainetta ja osa tuloilmasta on tullut vuotoreittien kautta, aiheuttaen vetoa. Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä on voinut olla väärin tasapainotettu. Sisäilman laatua ja lämpöviihtyvyyttä koskevia reklamointeja esiintyy edelleen, vaikka rakennusten ilmanpitävyys on käytävissä olevan aineiston perusteella parantunut. Sisäilmastoon ja lämpöviihtyvyyteen vaikuttavia tekijöitä on useita. Liian usein etsitään syytä vain yhden ainoan tekijän perusteella.

### 3. Kerrostalojen ja isojen rakennusten tiiviyyden mittaaminen

#### 3.1 Käytössä olevia standardeja

IEA Annex-46 – projektissa ” Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings - Energo” (ks. esim. www.annex46.org) [3] on valmisteltu usean maan yhteistyönä julkaisu ”Energy and Process Assessment Protocol for Buildings and Building Sites”. Osa siitä on ”International Protocol for the Measurement of Air-leakage in Large Buildings” [4]. Taulukko 1 esittää yhteenvedon olemassa olevista suosituksista, painottuen Pohjois-Amerikkaan. Taulukon 1 mukaan siinä esitetyt arvot voidaan muuttaa toiseen vertailupaineeseen kaavan

$$\text{Vuotoilmavirta} = C \times \text{Paine-ero}^n \quad (2)$$

avulla, eksponentti  $n = 0,65$ . USA:ssa käytetään ASTM E779 ja E1827-standardia. Kanadalainen vastaava standardi on CGSB 149.10. Britanniassa liikerakennuksille on käytössä ATTMA TS-1 ja muualla Euroopassa EN 13829. Protokollassa on myös eritelty eri standardien käyttökelpoisuutta isojen rakennusten testaamiseen sekä mittausten virhelähteitä.

Taulukko 1. Tiiviysvaatimuksia/suosituksia.

Units conversions for 0.25 CFM75/ft <sup>2</sup> to other common units made for a building 120 x 110 x 8 ft, 4 stories $n=0.65$	
0.25 cfm/ ft <sup>2</sup> at 75 Pa	Used by ASHRAE and US Army Corp
0.19 cfm/ ft <sup>2</sup> at 50 Pa	Used by some US researchers and an ASHRAE article
1.06 in <sup>2</sup> E <sub>f</sub> LA/100 ft <sup>2</sup> at 4 Pa	Used by US building scientists to calculate natural air exchange in houses
2.53 in <sup>2</sup> E <sub>q</sub> LA/100 ft <sup>2</sup> at 10 Pa	Used in Canada and other countries
1.12 Air Changes per hour at 50 Pa	Widely used for houses but not useful for comparisons in high rise buildings because volume to area ratios change so much.
3.51 m <sup>3</sup> /hr/m <sup>2</sup> at 50 Pa	Used in the UK to rate the permeability of commercial buildings
1.27 liters/s/m <sup>2</sup> at 75 Pa	Used by researchers in US, Canada and Europe for high rise buildings

### 4. Ilmanpitävyys uusissa kohteissa ja ilmanpitävyyden kehitys

#### 4.1 Kerrostalot sekä pien- ja rivitalot

Vuoden 2008 aikana VTT on mitannut eri yritysten uudistuotantokohteita [5]. Asuinkerrostalojen huoneistokohtaiset ilmapuotoluvut ovat vaihdelleet 0,3 1/h – 1,0 1/h välillä. Vuotokohdat ovat keskittyneet ikkunatiivisteisiin, parvekeoviin sekä porraskäytävän ulko-oviin. Vanhemmassa kerrostalokannassa huoneistokohtaiset tulokset ovat olleet jopa > 2,0 1/h – 3,0 1/h.

Uudisrakennuskohteiden porrashuoneiden ilmapuotoluvut ovat olleet yleensä >1,0 1/h, usein luokkaa 2 - 3 x yksittäisten huoneistojen ilmapuotoluvut. Porrashuoneiden toimivuuteen tulisikin kiinnittää huomiota. Vuotokäyrästä on määritetty myös yhtälön (1) mukainen kerroin sekä eksponentti  $n$ . Eksponentin arvo näyttää vaihtelevan tapauskohtaisesti suhteellisen laajalla alueella, joten  $n=0,65$  käyttö ei välttämättä anna oikeansuuntaista tulosta. Ylipaineella saatu  $n=0,65$

arvo on pääsääntöisesti  $> n_{50}$  (alipaine). Pien- ja rivitaloalvalmistajat ovat energiatehokkuuslaskelmien johdosta mittauttaneet uusien kohteiden tiiviyyttä. Rakentajat, jotka ovat kiinnittäneet erityistä huomiota tiiviYTEEN vaikuttaviin rakennedetaljeihin, ovat saavuttaneet pientalokohteissa tason  $n_{50} < 1,0$  l/h, siis kerrostaloasuntojen tasolle.

## 4.2 Mittausten virhelähteet ja tarkkuus

Jokaiseen mittaukseen sisältyy mittausvirhettä. Mittauksen suorittajan tulee tuntea käyttämänsä laitteen toimintaperiaate sekä toiminta-alue. Mikäli mittaustulos on epäilyttävä, mittaukset täytyy toistaa tai tulos täytyy yrittää tarkistaa. Mikäli tiiviyskoelaitteiston puhaltimen kapasiteetti on mitattuun ilmavirtaan verrattuna suuri, on mahdollisuus suurinkiin mittausvirheisiin. Myös ilmavirran mittaustavalla on merkitystä. Pienillä virtauksilla on mahdollisuus epästabiiliin mittaustulokseen sekä virtauksen kanavoitumiseen. Käytännössä tämä esiintyy pienissä ja tiiviissä asunnoissa. Jos pientalon mittaustulos on luokkaa  $\ll 0,5$  l/h, tulee saatu tulos pyrkiä todentamaan vaihtamalla puhallin pienempitehoiseen tai ilmoittaa tulos  $< 0,5$  l/h. Mittaustuloksen esittämistä kahdella desimaalilla yleisesti ja erikseen, kun tulos  $\ll 0,5$  l/h, tulisi välttää. Mittauksissa esiintyy aina hajontaa ja se tulisi ilmoittaa, jolloin toisen desimaalin tarkkuus on kyseenalainen. Useinkaan tiiviissä ja pienissä asunnoissa pienillä paine-eroilla ei saada aikaan mitattavaa tulosta. Kun paine-ero kasvaa  $> 20$  Pa, voidaan ilmavirtaustakin mitata, tietenkin esiintyy tapauskohtaisia eroja.

## 5. Mittausmenetelmät

EN 13829-standardin mukaisesti määritetään kohteen ilmatilavuus sekä  $n_{50}$  ali- ja ylipaineen keskiarvona ilmatilavuuteen verrattuna. Isojen kohteiden tiiviys voidaan mitata blower-door-menetelmällä, jolloin joudutaan käyttämään useita puhaltimia/laitteita, yleensä vielä kerroksittain asennettuna. Toinen vaihtoehto on käyttää yhtä isoa puhallinta. Tiiviysmittaus voidaan suorittaa myös rakennuksen oman ilmanvaihtojärjestelmän avulla, mikäli puhaltimet ovat taajuusohjattuja. Rakennuksen omia laitteita käyttämällä kanavavuodot sisältyvät mittaustulokseen. Kanavien tiiviys pitäisi kuitenkin olla erikseen tarkistettu. Isojen rakennusten, kuten urheiluhallien tiiviyyttä ja vuotoilmavuotoa on mitattu myös merkkiainekokeen avulla.

VTT:llä on käytössä tiiviysmittauksen toimintaohje [6]. Taulukossa 2 on esitetty tiivistelmä toimintaohjeen mittausepävarmuuteen liittyvistä asioista.

### 5.1 Tiiviiden pysyvyys ja kokonaisilmanvaihtuvuuden mittausmenetelmiä

#### 5.1.1 Tiiviiden pysyvyys

Kun tiiviysmittaukset aloitettiin noin 30 vuotta sitten, mitattujen pientalojen ilmavuotoluvut liikkuivat keskimäärin alueella 6 – 7 l/h. Tämän vuosikymmen alussa uusien pientalojen ilmanvuotoluku on ollut tyypillisesti 2 - 4 l/h. Tiiviystaso määräytyy rakennusvaiheessa. Jälkeenpäin tiiviystasoa on vaikea oleellisesti parantaa. Tiiviin kohteen ilmatiiviys voi pysyä yleensä tavanomaisessa käytössä suhteellisen vakiona.

*Taulukko 2. VTT:n toimintaohjeen tiivistelmä.*

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mittaustulosten käsittely ja esittäminen           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittausraportissa esitetään vähintään seuraavat tiedot:               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mittausajankohta</li> <li>▪ mittauspaikka</li> <li>▪ mittaajat</li> <li>▪ viittaus mittausstandardiin ja poikkeamat siitä</li> <li>▪ käytetyt mittausmenetelmät ja -laitteet</li> <li>▪ sääolosuhteet</li> <li>▪ tarvittaessa selvitys mittaukseen vaikuttavista häiriöistä.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- Paine-eromittauksen tulos ilmoitetaan paine-erolle 50 Pa määritettynä ilmanvaihtuvuutena eli ns. ilmanvuotolukuna <math>n_{50}</math>.</li> <li>- Mittausepävarmuus           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ilman tilavuusvirran mittauksen epävarmuus saa olla enintään <math>\pm 10\%</math>. Se sisältää sekä mittarin epävarmuuden että mittausmenetelmästä aiheutuvan epävarmuuden. Tuulen nopeus saa mittausten aikana olla enintään 5 m/s. Tällöin sen vaikutus mitattuun ilmavirtaan on alle <math>\pm 0,5\%</math>.</li> <li>• Paine-eromittauksen epävarmuus saa olla enintään <math>\pm 1</math> Pa (= <math>\pm 2\%</math>, kun paine-ero on 50 Pa). Tällöin vuotoilman mittausepävarmuus paine-erolla 50 Pa on enimmillään <math>\pm 10,2\%</math>.</li> <li>• Huoneen/huoneiston tilavuuden mittauksessa epävarmuuden voidaan arvioida olevan <math>\pm 2\%</math>. Täten ilmanvuotoluvun <math>n_{50}</math> kokonaisepävarmuus on enimmillään <math>\pm 10,4\%</math>.</li> <li>• Edellä esitetyt epävarmuusarviot edustavat 95 %:n kattavuustodennäköisyyttä.</li> </ul> </li> <li>- Laadunvarmistusmenettely           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektroniset mittarit ja anturit on kalibroitava vähintään kerran vuodessa. Kalibroinnista on oltava merkintä mittarin kyljessä. Kalibrointipöytäkirjasta on oltava kopio mittalaitteen mukana.</li> <li>• Elektronisille mittauslaitteille tehdään jokaisen mittausarjan alussa tarkistus tai pikakalibrointi.</li> </ul> </li> </ul>
---

**5.2 Tiiviiden mittaaminen merkkiainemenetelmällä**

Rakennuksen kokonaisilmanvaihdon ja hallitun ilmanvaihdon yhteyttä voidaan tutkia merkkiainekokeen avulla, pitoisuuden alenemamenetelmällä. Tutkittavaan tilaan johdetaan merkkiainetta, ilokaasua (typpioksiduuli,  $N_2O$ ) tai rikkiheksafluoridia ( $SF_6$ ), ja seurataan pitoisuuden laskua. Pitoisuuden aleneman avulla voidaan määrittää kokonaisilmanvaihtokerroin. Kun samanaikaisesti mitataan venttiilikohtaiset tulo- ja poistoilmavirrat, saadaan erotuksena vuotoilmavaihto kyseisessä mittaustilanteessa. Menetelmää voidaan käyttää myös vuotoilmanvaihdon määrittämiseen, kun ilmanvaihtojärjestelmä pysäytetään ja estetään ilman virtaus ilmanvaihtokanaviston kautta.

**5.3 Tiiviysmittauksen suorittaminen rakennuksen omalla ilmanvaihtojärjestelmällä**

Rakennuksen tai sen osan ilmanpitävyys voidaan mitata myös rakennuksen omalla ilmanvaihtojärjestelmällä. Mittausten edellytyksenä on, että poistoilmakoneet tai poistoilmakone ovat portaattomasti säädettäviä. Toinen edellytys on, että pääilmavirta koneen tai koneiden yli voidaan mitata. Mikäli rakennuksessa on useita ilmanvaihdon konehuoneita ja ilmanvaihtokoneita, voidaan tarvittaessa käyttää useampaakin puhallinta.

Yleensä on määritetty  $n_{50}$  alipaineessa, mutta periaatteessa ylipainemittauskin olisi mahdollista. Mittaus suoritetaan sulkemalla tuloilmapuhaltimet ja ajamalla poistoilmapuhaltimilla 5 - 10 Pa portain alipaine rakennukseen. Jos 50 Pa paine-eroa ei saavuteta, mutta käytävissä on 4 - 5 mittauspistettä, voidaan  $n_{50}$  tuloksista laskea.

Rakennuksen omia laitteita käytettäessä suurin ongelma on muiden rakennuksen läpivientien kuin iv-läpivientien tulppaus. Huippumurit voidaan katolta päällystää hupulla. Mikäli vain rakennuksen osa paineistetaan (esimerkiksi ilmanvaihtokonehuoneen palvelualue), on ongelmana rakennusten osien välien tiivistäminen. Erityisesti jos käytävätiloissa on alaslaskuja, on niiden yläpuolisten tilojen tiivistäminen vaikeaa, joskus mahdotontakin ilman erityisjärjestelyjä. Mikäli konehuoneessa on mitattavan puhaltimen ilmamäärämittaus tai mittaussyhteet, voidaan ilmamäärät mitata paine-eromittarilla puhaltimen ominaiskäyrää käyttäen. Vaihtoehtoisesti voidaan luottaa puhaltimen osoittavaan näyttöön, jos sellainen on, mutta varmintä on käyttää kalibroitua mittaria. Joissakin tapauksissa valvomoon paine-erolähtetimestä saatu viesti on ollut virheellinen. Mikäli puhaltimen ilmamääriä ei voida suoraan mitata, mutta pääkanavassa on mittaussyhteet (esim. mittasiipi tai pitot-yhteet), voidaan ilmavirrat määrittää niistä. Jos mittaussyhteiden jälkeen tai niitä ennen ei ole riittävästi häiriötäisyyttä, mittaustuloksessa on virhettä. Ilmamäärät voidaan mitata myös merkkiaineen avulla. Tällöin mitataan merkkiainesyöttö ennen puhallinta ja merkkiaineen konsentraatio puhaltimen jälkeen. Painesuhteet on syytä mitata molemmilta julkisivuilta mitattavasta kerroksesta, tai jos koko rakennus mitataan, puhaltimien ohjaukseen tarvittava paine-eromittaus tehdään esimerkiksi rakennuksen keskikerroksesta. Rakennuksen painesuhteet muuttuvat pystysuunnassa. Tehtyjen mittausten perusteella omia laitteita käyttämällä saadaan yleensä toistettava tulos, mutta jonka mittaustarkkuus saattaa ilmamäärämittauksen epätarkkuudesta johtuen vaihdella.

#### 5.4 Ilmavuotokohtien paikantaminen

Ilmavuotokohtat paikannetaan lämpökuvauksella tai merkkisavuilla. Lämpökuvauksella on tehokkain keino ilmavuotokohtien paikantamisessa. Usein tiiviysmittauksen tilaajat unohtavat vuotokohtien paikantamisen, todennäköisesti kustannussyistä. Vuotokohtien paikantaminen myös tiiviissä rakennuksissa on olennainen osa ilmanpitävyyden mittausta. Tiiviysmittaus voidaankin suorittaa rakenteiden lämpökuvauksen yhteydessä [7], jolloin ilmavuotokohtat voidaan erottaa rakenteellisista kylmäsilloista. Mikäli vuotokohtia ei paikanneta, on vaarana että pahimmassa tapauksessa mittaukset joudutaan uusimaan.

### 6. Tiiviiden kehittämistä käytännössä

Oulun kaupungin Rakennusvalvontavirasto on pientalon teknisen laadun kehityshankkeessaan pyrkinyt järjestelmällisesti parantamaan vaipan ilmatiiviyyttä. Tavoitteellinen työ alkoi vuonna 2005 Oulun asuntomessurakentamisesta. Vuoden 2007 alusta viraston ponnistelu tiiviiden kehittämiseksi on liittynyt tehokkaimpina yksittäisenä keinona pientalojen energiatehokkuuden parantamiseen. Oulun pientalotuotantoa koskevat tulokset ovat mielenkiintoisia sekä tiiviiden että energiatehokkuuden paranemisen osalta.

Viimeaikaisten kosteusvauriopohtojen seurauksena Oulu on alkanut ohjeistaa pienrakentamisen ilmatiiviyyttä myös energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien vaurioriskien tehokkaimpina hallintakeinoina. Asuntomessutaloissa, joissa tiiviyyteen oli kiinnitetty erityistä huomiota, saavutettiin keskimääräinen ilmanvuotoluku 2,0 l/h. Tämä arvo on nyt Oulussa jo ohitettu. Oulun koko uudispientalotuotannon vuotoluku on pudonnut keskimäärin tasolle 1,5 l/h vaihdellen käytännössä välillä 0,2 – 2,0 l/h. Arvio perustuu satoihin mittauksiin. Samalla on saavutettu lämmitysenergian kulutuksessa vuoden 2008 koko omakotitalotuotannossa keskimäärin 31 %:n laskennallinen säästö määräystasoon verrattuna. Vuoden 2009 säästötavoite on 35 %.

Kun oletetaan Oulussa ilmanvuotoluvun olleen aikaisemmin maan keskiarvossa 3 – 4 l/h, merkitsee nykyinen tilanne ilmanvuotoluvun 2 – 3 yksikön parannusta. Se puolestaan merkitsee yksinään lämmitysenergian kulutuksessa noin 15 %:n säästöä eli puolta saavutetusta kokonaissäästöstä. Tiiviyn parantamisen edellyttämä lisäkustannus on ollut vähäinen. Se onkin energiansäästöissä kustannustehokkain rakenteellinen keino.

Oulun rakennuttajien kiinnostuminen tiiviys- ja energia-asioista sekä tapahtunut kehitys perustuu pitkälti rakennusvalvonnan tavoitteenasetteluun ja ohjaukseen. Sitä tukemaan on virinnyt voimallinen kehitysyhteistyö alueen toimijoiden. Pientalon tiiviyttä ja laatua on kehitetty parin vuoden aikana mm. usean kymmenen päättötöy puitteissa. Oulun rakennusvalvonta on tiiviyskortissaan ohjeistanut omaan rakennuslupavalmisteluunsa liittyvän tiiviyn arvioinnin ja saavuttamisen. Ohjeessa on huomioitu seudun kehitystyö ja saavutetut tulokset. Laatukortit ovat viraston kotisivuilla (<http://www.ouka.fi/rakennusvalvonta/>). Rakennusvalvonnan mielestä työkalujen pitää olla yksinkertaisia ymmärtää ja selkeitä soveltaa, ei kaiken kattavia.

## 7. Tiiviyn vaikutus energiankulutukseen sekä sisäolosuhteisiin

Tällä hetkellä ei ole käytettävissä yksittäisiä kohteita lukuun ottamatta laajempaa mitattua tietoa tiiveyden vaikutuksesta energiankulutukseen. Koska sisäolosuhteet ovat aina usean tekijän summa, hallitsemattomat ilmavuodot vaikuttavat myös välillisesti energiankulutuksen nousuun. Mikäli lämpöviihtyvyys (vedontunne, pintalämpötilat) laskee, sitä kompensoidaan sisälämpötilaa nostamalla, esim. 2-3 °C. Väärin tasapainotettu ilmanvaihto (liian suuri alipaine) lisää ilmavuotoja vuotoreittien kautta ja siltä osin energiankulutusta. Lisäksi hallitsemattomat ilmavuodot rakennuksen osista toisiin tai esimerkiksi alapohjasta rakennukseen voivat aiheuttaa sisäilmaongelmia ja pahimmassa tapauksessa terveyshaittoja. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmän palvelualueet eivät ole keskenään tasapainotettu ja alapohjarakenne vuotaa rakennuksen käyttökerroksiin, voivat alapohjassa olevan, mahdollisesti kontaminoituneen materiaalin päästöt johtua asuin- tai käyttökerroksiin. Ilmanvaihtojärjestelmiä on jouduttu muuttamaan, korjaamaan ja säätämään sekä rakenteita tiivistämään. Jälkikäteen tiivistäminen voi osoittautua vaikeaksi. Eräissä kohteissa on rakennuksen alapohjaa vasten oleva lattiarakenne jouduttu kapseloimaan. Joissakin tapauksissa tuuletetun alapohjan maa-aines on jouduttu vaihtamaan ja ryömintätilaa suurentamaan. Tällainen työvaihe ryömintätilassa suoritettuna joudutaan tekemään käsityönä. Vastaavia tapauksissa on ollut myös omakotitalokauppojen yhteydessä, kun rakennukseen on tehty kuntotutkimus. Kun vanhojen rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää on muutettu painovoimaisesta koneelliseksi, on vuosien mittaan seinärakenteeseen esimerkiksi sisäilman vesihöyryn tiivistymisen johdosta kontaminoituneet pitoisuudet tulevat takaisin huoneilmaan painesuhteiden muuttuessa. Rakennusten ilmanpitävyys ei ole siis pelkästään energiatehokkuuteen liittyvä asia, vaan se vaikuttaa myös rakennuksen sisäilmaston laatuun ja ilmanvaihtojärjestelmän toimintaan.

Seuraavassa esitetään esimerkkilaskelma erään koulun energiankulutusarviosta, joka tehtiin käyttöönoton yhteydessä. Kohde on Uudellamaalla, rakennustilavuus on 20 000 m<sup>3</sup>. Energiankulutusarviot on laskettu aikaisemmin voimassa olleen Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5, Ohjeet 1985, pohjalta laaditulla WinEtana laskentaohjelmalla. Laskennan tuloksena saatava kaukolämmitysenergian ensimmäinen kulutusarvio on 26,3 kWh/m<sup>3</sup> Ilmanvaihdon lämpöhäviö on ensimmäisen arvion mukaan 25,7 kWh/m<sup>3</sup> ja osuudeltaan suurin lämpöhäviökomponentti. Kohteen kulutus toisena käyttövuotena oli lähellä laskettua – tämän laskelman tarkoituksena oli esittää miten suhteellisen vähänkin energiaa kuluttavassa rakennuksessa voi esiintyä merkittävää säästöpotentiaalia (taulukko 3).

*Taulukko 3. Ilmanpitävyyden vaikutus energiankulutukseen.*

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esimerkissä käyntiaikoja muutetaan 12 tunnista 10 tuntiin vuorokaudessa</li> <li>• Kaukolämmitysenergian kulutus on tämän toisen arvion mukaan 23,1 kWh/m<sup>3</sup></li> <li>• Ilmanvaihdon <u>lämmöntalteenoton parantamisella</u> voidaan ilmanvaihdon lämpöhäviöihin vaikuttaa edelleen pienentävästi.</li> <li>• Esimerkissä lämmöntalteenoton hyötysuhdetta muutetaan 50 %:sta 60 %:iin</li> <li>• Kaukolämmitysenergian kulutus on tämän kolmannen vaiheen arvion mukaan 20,1 kWh/m<sup>3</sup></li> <li>• Rakennuksen <u>ilmanpitävyyttä parantamalla</u> voidaan yleensä parantaa sekä sisäilmastoa että energiatehokkuutta.</li> <li>• Esimerkkikoulun rakenneksityiskohtien huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella tavoitellaan vuotoilmanvaihdon puollittaminen arvosta 0,1 1/h. Kaukolämmitysenergian kulutus on tämän neljännen vaiheen arvion mukaan 18,1 kWh/m<sup>3</sup></li> <li>• Esimerkkikoulun kaukolämmitysenergian ensimmäinen kulutusarvio 26,3 kWh/m<sup>3</sup> saatiin yksinkertaisin tarkennuksin pienentymään yli 30 % arvoon 18,1 kWh/m<sup>3</sup></li> <li>• Tavoitteen toteutuminen edellyttää huolellista toteutusta, oletusten mukaista käyttöä ja asiantuntevaa ToVa (toimivuudenvarmistus)-toimintaa rakennuksen suunnitellun käyttöiän ajan.</li> </ul>
--

**8. Johtopäätökset**

Uusissa kohteissa, joissa ilmanpitävyyttä on pyritty parantamaan, on päästy hyviin tuloksiin. Nykyisinkin käytetyillä rakennusmenetelmillä ja asennustavoilla voidaan saavuttaa riittävän hyvä taso. Rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat useat muut tekijät vuotoilmanvaihdon lisäksi. Kun ilmavuotoluku määritetään 50 Pa paine-erolla, saadaan vertailukelpoinen arvo jossa häiriötekijöiden, kuten sääolosuhteiden vaikutus, on minimoitu. Rakennusten painesuhteiden pitäisi vaihdella 0 -10 Pa alipaineen välillä. Vanhemmassa rakennuskannassa, jossa on koneellinen poistoilmanvaihto ja ulkoilmaventtiilit tai tuloilman tulo järjestetty käytännössä vaipan vuotojen kautta, voi alipaine nousta yli -30 Pa. Samoin jos ilmanvaihtojärjestelmä ei ole oikein tasapainotettu, voi esiintyä liian suuria paine-eroja. Ilmavuotoluku kertoo rakennusten tiiviyserot 50 Pa paine-eron vallitessa. Tällaisia olosuhteissa ei käytännössä esiinny kuin erittäin kovalla tuulella. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamat paine-erot ovat normaalitasolla 0-10 Pa, vuotoilman vaikutus tiiviissä rakennuksissa ( $n_{50} < 1,0$  1/h) on vähäinen muihin tekijöihin verrattuna.. Olennainen asia on miten hallitsemattoman ilmanvaihdon eli ilmavuotojen osuus määritetään normaaleissa käyttöolosuhteissa, ja vuotoilmanvaihdon määrittäminen ilmavuotokäyrän ja  $n_{50}$  – luvun perusteella.

Ilmavuotokäyrästä ja vuotoyhtälöstä laskettu ilmavuoto normaaleissa käyttöolosuhteissa antaa yleensä liian suuren tai ainakin erilaisen arvon kuin  $n_{50}/25$ . Tämä suhdeluku (jakajan arvo) riippuu todennäköisesti myös kohteen ilmavuotoluvun arvosta.  $n_{50}$  arvon tulee olla määriteltyjen lukujen tasolla tai niitä parempia. Nykyinen kehitys ja ilmanpitävyyden parantaminen on oikea tie rakennusten laadunvalvonnassa ja yleisimmin rakennuksen ja sisäilmaston toimivuuden varmistusmenetelmien kehittämisessä. Koska uudisrakentamisen volyyymi on vain 1 - 2 % rakennuskannasta, pitää myös kehittää olemassa olevan rakennuskannan ilmanpitävyyttä. Jos pientalon tai rivitaloaluoneiston ilmavuotoluku  $n_{50}$  on 0,4 1/h tai 0,9 1/h, ei sillä rakennuksen lämpötekniseen toimivuuteen ole suurta vaikutusta verrattuna sisälämpötilan noston tai laskun vaikutukseen yhdellä asteella. Suurempi merkitys on myös muilla lämpöviihtyvyyteen vaikuttavilla tekijöillä.

## 9. Yhteenveto

Rakennusvaipan ilmatiiviyyden merkitys voidaan tiivistää seuraavasti (taulukko 4):

*Taulukko 4. Ilmanpitävyyden merkitys*

Edut
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energiankulutus vähenee. Yhden yksikön (1 l/h) vähennys ilmanvuotoluvussa (n50) vähentää lämmitysenergian kulutusta noin 6 % tyypilliseen suomalaiseen pientaloon verrattuna.</li> <li>▪ Rakennusvaipan epätiiviyydestä johtuvat hallitsemattomat ilmavirtaukset vähentyvät, jolloin vedontunne vähenee ja lattiapinnat eivät jäähydy epämuukaviksi.</li> <li>▪ Sisäilman kosteuden virtaaminen rakenteisiin vähenee.</li> <li>▪ Rakenteista tulevien epäpuhtauksien (mineraalikulut, mikrobit, radon) virtaaminen sisäilmaan vähenee.</li> <li>▪ Ilmanvaihtolaitteiston toiminta on paremmin hallittavissa. Hatarassa talossa lämmöntalteenottolaite ei tuo odotettuja säästöjä.</li> </ul>
Huomioitavat asiat
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ilmanvaihto on säädettävä tasapainoon erityisen huolellisesti, jotta vältetään liian suuret paine-erot ulko- ja sisäilman välillä (tämä voi ilmetä ikkunoiden ja ovien avaamisen vaikeutena).</li> <li>▪ Jos ilmanvaihtokone sammuu esimerkiksi vian tai sähkökatkoksen takia, on ilmanvaihto voitava varmistaa avattavien ikkunoiden tai tuuletusluukkujen avulla.</li> </ul>

Jatkossa pitäisi pyrkiä asettamaan selvät tavoitearvot eri rakennuksille. Samoin menetelmiä tulee tarkentaa ja ohjeistaa. Laskentamenetelmiä ja tiiviyyteen kohdistuvaa tutkimista tulee edelleen kehittää ja jatkaa. Olennaista on valmiista rakennuksista saatava vertailutieto – mikä on ilmanpitävyyden parantamisen todellinen vaikutus energiatehokkuuteen. Rakennusten ilmanpitävyydessä on tärkeää, että asetetaan tavoitetaso, ja suunnittelu- ja toteutusvaihteen toimenpitein se toteutetaan. Tämä edellyttää työmaalla ohjeistamista sekä myös suunnitteludetaljien kehittämistä. Tavanomaisia menetelmiä käyttämällä, mutta kiinnittämällä erityistä huomiota ilmanpitävyyteen vaikuttaviin asioihin voidaan saavuttaa hyväksi katsottava tiiviystaso, pientaloissa  $n50 < 1,0$  l/h. Vuotokohdat pitäisi paikantaa myös tiiviissä rakennuksissa.

Tiiviysmittaus on lämpökuvausten ja muiden mittausten ohella yksi rakennuksen toimivuuden ja laadunvarmistuksen menetelmistä. Rakennusten lämpökuvaus on nykyään sertifioitua toimintaa. Koska tiiviysmittaus ja lämpökuvaus kuuluvat läheisesti yhteen, on rakennusten lämpökuvaajien sertifiointikoulutuksessa tiiviysmittaus otettu mukaan täydennysosiona. Tiiviysmittaus tullaan tulevaisuudessa sertifioimaan.

### Lähdeluettelo

- [1] Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje – luonnos (Tampereen Teknillinen Yliopisto 2009)
- [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] [www.annex46.org](http://www.annex46.org)
- [4] Genge, Colin: International Protocol for the Measurement of Air-leakage in Large Buildings (a draft for A.Zhvivov & al: Energy and Process Assessment Protocol for Buildings and Building Sites. IEA Annex-46) Retrotec Energy Innovations, Ltd. 2009
- [5] Kauppinen, T, Ojanen, T, Kovanen, K, Laamanen, J ja Vähäsöyrinki, E. Rakennusten ilmanpitävyys. Sisäilmastoseminaari 2009. Sisäilmayhdistys, Espoo 2009.
- [6] Tiiviysmittauksen toimintaohje. VTT:n sisäinen ohje, Espoo 2009
- [7] SFS-EN 13817. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781:1983 modified). SFS 1998



# Kerrostalon ilmanpitävyyden määrittäminen koko portaalla mittauksena

Anu Aaltonen ja Juha Vinha  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos on tehnyt Skanska Kotien toteuttamissa kerrostaloissa ilmanpitävyyksmittauksia, joiden tavoitteena on määrittellä betonielementtirakenteiselle kerrostalotyypille ilmoitettu ilmavuotoluku. Mittaukset on toteutettu koko portaalla mittausmenetelmällä. Koko portaalla mittausmenetelmää ei ole Suomessa vielä juurikaan käytetty, joten mittaussarjan edetessä on löydetty ohjeita ja standardeja täydentäviä hyviä käytännön ratkaisuja. Mitattavien tilavuuksien kasvaminen asuntojen ja pientalojen suuruusluokasta tuo mukanaan myös eräitä ilmiöitä, joiden laskennallista huomioon ottamista tulisi kehittää kerrostalojen mittausten lisääntyessä.

## 1. Johdanto

Vuoden 2008 alussa voimaan tulleiden lämmöneristys- ja energiankulutusmääräysten (vuoden 2007 rakentamismääräykset) ja -ohjeiden mukaan rakennuksen hyvää ilmanpitävyyttä voidaan hyödyntää rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittamisessa, energiankulutuksen laskennassa ja energiatehokkuusluvun määrittämisessä. Ilmanpitävyys voidaan määrittää rakennuksessa tehtävän painekokeen avulla ja sitä kuvaa ilmavuotoluku ( $n_{50}$ ) (1/h).

Teollisia talotoimittajia varten on juuri ilmestynyt laadunvarmistusohje, jonka perusteella erilaisille talotyypeille voidaan määrittää ns. ilmoitettu ilmavuotoluku ( $n_{50,ilm}$ ) (1/h) [1]. Tätä arvoa voidaan käyttää laskelmissa ilmavuotoluvun raja-arvon tilalla ilman, että jokaista rakennusta tarvitsee mitata erikseen painekokeella. Mittausta edellyttävä ilmavuotoluvun raja-arvo ( $n_{50,raja}$ ) (1/h) annetaan Rakentamismääräyskokoelman osassa D3, ja se on sekä vuoden 2007 että vuoden 2010 rakentamismääräyksissä 4,0 1/h [2, 3].

Tässä artikkelissa käsitellään painekokeiden sarjaa, jonka tavoitteena on ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittäminen betonielementtirakenteiselle kerrostalotyypille. Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos on tehnyt seitsemän mittauksen koesarjan Skanska Kotien toteuttamissa kerrostalokohteissa koko portaalla mittausmenetelmällä. Kohteet ovat v. 2009 valmistuneita uudisrakennuksia, joissa ei mittaushetkellä ollut vielä asukkaita. Artikkelin käy läpi ilmavuotoluvun laadunvarmistusohjeen mukaisen mittausprosessin ja tuo esille monia työn edetessä havaittuja käytännön seikkoja, joiden huomioon ottaminen määräysten ja ohjeiden lisäksi helpottaa mittauksia ja auttaa luotettavampien tulosten saavuttamisessa.

## 2. Mittausten valmistelu

### 2.1 Työmaan valmiusaste

Painekokeen toteutus kuvataan standardissa SFS-EN 13829 [4]. Kokeen onnistunut suoritus edellyttää, että rakennuksen ulkovaippa on valmis siltä osin, että ilmansulkuna toimiva kerros tai kerrokset ovat tiiviit ja yhtenäiset. Ikkunoiden, parvekeovien ja ulko-ovien asennus ja tiivistys tulee olla tehty ja asianmukaiset sulkimet paikoillaan.

Vaikka standardissa mainitaan vain vaipan valmistumisesta, käytäntö on osoittanut, että kohteen tulisi olla mahdollisimman valmis mittausta suoritettaessa. Koska kaikki tarkoitukselliset ilmanvaihdon reitit on suljettava painekoetta varten, ilmanvaihtokoneiden, -putkien ja venttiilien asennusten pitäisi olla valmiit. Tämä helpottaa sulkemisen tekemistä systemaattisesti ja kaikkien ilman kulkureittien hallitsemista. Monissa tapauksissa osa ilmanvaihdon sulkutyöstä joudutaan tekemään katolla, joten kattosiltojen, tikkaiden ym. kulkureittien katolla ja katolle tulee olla käyttökelpoiset ja turvalliset.

Teippaamalla suoritettava venttiilien ym. aukkojen sulkeminen ei onnistu, mikäli ympäröivillä pinnoilla on tuoretta maalia tai runsaasti rakennuspölyä. Myös mitattavan alueen yleissiivous pitäisi olla tehtynä kokonaisuudessaan: on mahdollista, että kokeen aikaiset paineenvaihtelut kuljettavat pölyä esim. porraskäytävästä loppusiivottuihin huoneistoihin.

Usein valmistumassa olevassa kohteessa tehdään kiivaasti viime hetken töitä ja työmaalla liikkuu vielä paljon eri yritysten henkilöstöä. Monissa tapauksissa tämä hankaloittaa mittauksen tekoa huomattavasti, kun esim. ulko-ovien availua painekokeen aikana ei pystytä valvomaan. Jos viimeistelytöiden ja asukkaiden sisään muuton väliin ei voida järjestää rauhallista mittauspäivää, saattaa olla tarkoituksenmukaista järjestää varsinainen kokeen suoritus työajan ulkopuolelle.

Kaikki edellä mainitut seikat on syytä käydä läpi ajoissa kohteen työnjohdon kanssa ja varmistaa, että niiden merkitys mittauksen onnistumiselle on ymmärretty ja työmaa on mittausajankohtana sovitussa kunnossa.

### 2.2 Piirustukset ja laskelmat

Mittauksen suorittajan tulee saada käyttöönsä kohteen ajantasaiset piirustukset mittauksen suunnittelua ja laajuustietojen laskemista varten. Pääpiirustuksista tärkeimmät ovat kaikkien kerrosten pohjakuvat sekä riittävä määrä leikkauksia. Näiden perusteella suunnitellaan mitattava alue ja sen rajaaminen siten, että mukana ovat kaikki huoneistot ja tilat, joihin kulku tapahtuu saman porrashuoneen kautta. Porrashuoneille yhteiset tilat pyritään jakamaan siten, että rajaava seinä olisi mahdollisimman ilmanpitävä – yleensä näin päädytään palo-osastoinnin mukaiseen määrittelyyn. Pääpiirustuksista lasketaan mitattavan alueen hyötymäärä, ulkovaipan pinta-ala ja rakennuksen ilmatilavuus Rakentamismääräyskokoelman osan D5 [5], standardin SFS-EN 13829 [4] ja laadunvarmistusohjeen RT 80-10974 [1] mukaisesti. Arvot syötetään mittauksen alkaessa mittauslaitteistolle, joka laskee niiden perusteella ilmavuotoluvun suoraan mittauksen päätteeksi. Vaikka painekoe pystytään viemään läpi myös summittaisesti arvioituilla pinta-aloilla ja tilavuudella, ennakkoon lasketuilla tarkoilla arvoilla on helpompi tarkastella mittauksen onnistumista, mahdollisia karkeitä virheitä sekä kohteen ilmanpitävyyttä heti mittauspaikalla, jolloin virheiden korjaaminen ja mittauksen toistaminen on vielä mahdollista.

LVI-piirustuksista tarvitaan lähinnä IV-pohjakuvia, joiden perusteella selvitetään ilmanvaihdon reititys ja yhteydet, poistokanavien ja huippumurien ryhmitys katolla sekä ilmanvaihtojärjestelmästä erilliset raitisilmaventtiilit. Näin pyritään varmistamaan, että kaikki ilmanvaihdon reitit tulevat varmasti suljetuiksi. Piirustukset otetaan mukaan mittaukseen tarkistuksia varten.

### 3. Mittausten suoritus

#### 3.1 Mittausmenetelmän kuvaus

Ilmavuotoluvun mittaus voidaan tehdä painekoelaitteistolla tai rakennuksen omilla ilmanvaihtolaitteilla. Jälkimmäinen edellyttää sitä, että mitattava rakennus on varustettu keskitetyllä ilmanvaihtojärjestelmällä. Mittauksessa suositellaan käytettäväksi painekoelaitteistoa, jonka antama mittaustulos on luotettavampi. [1].

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos käyttää painekoemittauksissa APT-laitteella (Automated Performance Testing) varustettua Minneapolis Blower Door -laitteistoa ja Tectite-ohjelmistoa. Nyt mitatuissa kerrostalo-kohteissa vain yhdessä oli keskitetty ilmanvaihto, joten kaikki mittaukset tehtiin painekoelaitteiston avulla. Vaikuttaa siltä, että asuntokohtaiset ilmanvaihtokoneet ovat kerrostaloissakin yleistynyt valinta, joten ilmanvaihtolaitteilta mitattava ilmavuotoluku saattaa jäädä käyttöön vain erikoistapauksissa. Tässä artikkelissa kuvataan tyypillistä tilannetta, jossa asunnoissa sekä tulo- että poistoilmanvaihto tapahtuu asuntokohtaisella IV-koneella ja yleisissä tiloissa on yksi tai useampi koneellisen poiston hoitava huippumuri sekä painovoimainen korvausilman tulo raitisilmaventtiilien kautta.



Kuva 1. Blower Door -laitteisto parvekeoveen asennettuna.

Ilmoitetun ilmapuotoluvun käytön vaatimat painekokeet voidaan tehdä kerrostaloissa joko yksittäisistä huoneistoista, yhdestä tai useammasta kokonaisesta portaasta tai koko rakennuksesta mittaamalla [1]. Koesarjan seitsemästä kohteesta viidessä oli yksi porrashuone ja kahdessa useampia, joten koko portaan mittausmenetelmä oli valinta, joka sopi kaikkiin kohteisiin. Koko portaan mittausmenetelmässä huoneistojen kaikki väliovet ja porraskäytävään vievät ulko-ovet avataan, samoin kaikkien niiden tilojen ovet, jotka kuuluvat mitattavaan tilavuuteen. Mittaus tulisi suorittaa kahtena sarjana, sekä ali- että ylipaineella (standardin mukaiseen mittaukseen riittää vain toinenkin [4]). Nyt mitatuissa kohteissa tehtiin molemmat mittaukset ja lopullinen ilmapuotoluku laskettiin niiden keskiarvona.

### 3.2 Valmistelevat työt

Ensimmäinen tehtävä mittausryhmän saapuessa työmaalle on mittauspisteen valinta. Mittauslaitteisto sijoitetaan korkeussuunnassa mahdollisimman keskelle rakennusta, tyypillisesti keskimmäisen kerroksen jonkin asunnon parvekeoven aukkoon. Asunnon suuntaus pyritään valitsemaan niin, että parveke on tuulensuojainen eikä aurinkoisella säällä kovin paahteinen. Parvekkeen on oltava myös riittävän avoin, jotta laitteiston puhaltimen ilmavirta pääsee liikkumaan suhteellisen esteettömästi. Asunnon pohjapiirroksen olisi hyvä olla sellainen, että yhteys parvekeovelta porraskäytävään ei ole kovin sokkeloinen: tällöin mitattavan tilavuuden sisäiset paine-erot tasaantuvat tehokkaammin ja nopeammin.

Suunniteltu mittausalue käydään läpi ja varmistetaan, että siitä voidaan tehdä ulkovaipaltaan tiivis kokonaisuus, jossa kaikki ilmankulkureitit voidaan sulkea. Käytännössä ongelmia ovat tuottaneet esim. autotallit ja jätehuoneet, jotka ovat osa ilmansulun rajaamaa laskentatilavuutta, mutta joiden ovet eivät ole riittävän tiiviitä painekokeen läpiviemiseksi tai joihin ei ole suoraa yhteyttä mittausalueen sisältä. Mittausaluetta muutetaan tarvittaessa ja muutosten vaikutus pinta-ala- ja tilavuustietoihin tarkistetaan.

Ilman tarkoituksellisten kulkureittien sulkeminen on yleensä mittauksen työläin osa. Siihen pitäisikin varata runsaasti aikaa ja riittävästi työvoimaa, etenkin kohteissa, joissa on asuntokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä. Kaikki ilmanvaihtokoneet sammutetaan ja erilliset ilmanvaihtojärjestelmät asunnoissa ja yleisissä tiloissa suljetaan erikseen. Parhaaksi tässä työssä on osoittautunut harmaa ilmastointiteippi, mutta varusteissa tarvitaan myös leveää maalarinteippiä arkoja pintoja varten ja esim. jätessäkkejä suurempien alueiden, kuten tulisijojen suuluukkujen tiivistämistä varten.

Asunnoissa suljetaan ilmanvaihto IV-koneelta teippaamalla. Joissakin konemalleissa sekä tulo- että poistoilman kulku voidaan sulkea koneelta, mutta usein poistoilman reitti on suljettava katolla sijaitsevan poistoputken päästä. Mikäli nämä sulkutoimenpiteet eivät syystä tai toisesta käy päinsä, kunkin asunnon kaikki poisto- ja korvausilmaventtiilit sekä liesituuletin teipataan kiinni erikseen. Myös mahdollisten tulisijojen suuluukat ja hormien aukot suljetaan tiiviisti teipillä. Rutiinitoimenpiteenä on syytä laskea vettä asuntojen lattiakaivoihin, jotta vielä kuivillaan oleva kaivo ei päästäisi alipaineessa viemärin hajua huoneistoon. Lopuksi tarkistetaan, että asunnon ikkunat ja parvekeovet ym. ovat kiinni ja kaikki väliovet auki.



*Kuva 2. Asuntojen poistoilmaputkien teippausta katolla.*

Yleisten tilojen ilmanvaihtojärjestelmät käydään läpi samaan tapaan: poistojärjestelmä teipataan katolta tai venttiileiltä ja korvausilmajärjestelmä tavallisesti venttiileiltä. Korvausilmaventtiilien sijainti on syytä tarkastaa huolellisesti sekä piirustuksista että silmämääräisesti, jotta kaikki aukot tulevat tukituiksi. Väestönsuojasta riittää normaalikäytössä olevan ilmanvaihtojärjestelmän huomioon ottaminen; kriisiajan ilmanvaihto tapahtuu suljetussa järjestelmässä, joka ei normaalitilanteessa ole yhteydessä muuhun ilmanvaihtoon eikä huonetilaan.

Jos painekoemittauksen yhteydessä tehdään kohteen lämpökamerakuvaus, tässä vaiheessa kierretään kuvaamassa kriittiset paikat, kuten liitokset, nurkat ja saumakohtat.

### **3.3 Mittauksen kulku**

Ennen mittauksen käynnistämistä mitataan normaalitilanteessa vaipan yli vallitseva paine-ero rakennuksen ylimmästä ja alimmasta kerroksesta. Vaikka tuloksissa ilmoitetaan keskikerroksessa sijaitsevalta mittauslaitteistolta mitattava paine-ero, tulisi ylä- ja alakerroksen paine-eroja seurata kokeen aikana ja varmistaa näin, että paine-ero pääsee muodostumaan ulkovaipan yli kaikkialla mitattavassa tilassa.

Painekoe käynnistetään niin, että laitteisto asetetaan ylläpitämään vakiosuuruista alipainetta, esim. 50 Pa, n. 10 – 15 minuutin ajaksi, jolloin rakennuksen sisäiset paine-erot tasaantuvat. Vakio paineen luoma vedon tunne paljastaa myös mahdollisesti huomaamatta jääneet ilman kulkureitit ja tiivistysteippauksien heikkoudet, joten kaikki tilat ja teippaukset tarkistetaan tänä aikana. Ulko- ja sisälämpötila mitataan ja vallitsevat sääolot kirjataan muistiin.

Varsinaisessa painekokeessa mittauslaitteisto luo puhaltimen avulla ulkovaipan yli paine-eron, jota kasvatetaan 10 Pa kerrallaan. Tyypillinen mittausarja käsittää mittaukset välillä 10 – 60 Pa. Kullakin paine-erolla mitataan laitteiston läpi eli ulkovaipan yli kulkeva ilman tilavuusvirta. Blower Door APT-laitteisto tekee mittaukset ja puhaltimen säätämisen automaattisesti sekä ohjaa käyttäjää tekemään tarvittavat säätö- ja korjaustoimenpiteet.

Lämpökamerakuvausta varten 50 Pa vakioalipaine käynnistetään vielä n. 20 – 30 minuutiksi, jotta rakenteiden läpi vuotokohdista virtaava ilmavirta jäädyttää rakenteen ja saa näin pienetkin vuodot näkymään lämpökamerakuvissa. Kuvauskierros tehdään nyt uudestaan kuvaten samat kohdat kuin normaalipaineessa ja lisäksi mahdolliset alipaineen paljastamat vuotokohdat.

Kun painekoe on tehty ja mittauksista lähtenyt loppuaan, on erittäin tärkeää, että kaikki tehdyt tiivistykset ja teippaukset poistetaan. Unohtuneet sulut voivat aiheuttaa myöhemmin paljon harmia ja jopa laitteistovaurioita, kun ilmanvaihto ei toimikaan suunnitellulla tavalla. Varsinkin silloin, jos kohteessa työskentelee suuri ryhmä, purku hoidetaan tehokkaimmin jokaisen poistaessa itse tekemänsä tiivistykset.

#### 4. Tulokset ja niiden tarkastelu

Taulukkoon 1 on koottu keskeisimmät tulokset tehdyistä mittauksista. Kohteet on järjestetty tilavuuden mukaan pienimmästä suurimpaan; sama järjestys ja kohdenumerointi toistuvat kaikissa taulukoissa ja kaavioissa. Taulukosta 1 on jätetty yhden kohteen tiedot pois, koska tässä kohteessa ei kyetty saavuttamaan luotettavaa mittauksista. Kohteen mittauksessa ilmenneitä ongelmia on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2.

*Taulukko 1. Mittaustuloksia koko portaalan mittauksena tehdyistä painekokeista. Taulukossa on esitetty sekä alipainekokeen (ap) että ylipainekokeen (yp) mittauksista.*

Kohde	Yksikkö	1	2	3	4	5	6
Tilavuus	m <sup>3</sup>	3 797	4 060	5 065	5 469	5 494	10 490
Vaipan ala	m <sup>2</sup>	1 629	1 652	2 123	2 234	2 177	3 548
V/A <sub>E</sub>	m	2,3	2,5	2,4	2,4	2,5	3,0
Ilmavirtaus ap	m <sup>3</sup> /h	2460	3787	4269	1993	2554	3555
Ilmavirtaus yp	m <sup>3</sup> /h	2680	4415	4348	2184	2636	3690
n <sub>50</sub> , ap	1/h	0,6	0,9	0,8	0,4	0,5	0,3
n <sub>50</sub> , yp	1/h	0,7	1,1	0,9	0,4	0,5	0,3
n <sub>50</sub> , k.a.	1/h	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>
q <sub>50</sub> , ap.	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	1,5	2,3	2,0	0,9	1,2	1,0
q <sub>50</sub> , yp.	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	1,6	2,7	2,0	1,0	1,2	1,0
q <sub>50</sub> , k.a.	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	<b>1,6</b>	<b>2,5</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>1,0</b>
q <sub>50</sub> /n <sub>50</sub>	-	2,3	2,5	2,2	2,5	2,4	2,5

Luvuissa 4.3. ja 4.4. tehtyjä vertailuja ajatellen edellä kuvattu otos on hankala sikäli, että viiden ensimmäisen kohteen tilavuuksien suuruusluokka on jokseenkin sama, kun taas viimeinen kohde on niitä yli kaksi kertaa suurempi. Suuremmalla hajonnalla ja luonnollisesti suuremmalla otoksella tarkastellut ilmiöt saataisiin näkyvämmiin esille.

Taulukon 1 tuloksista voidaan havaita, että ali- ja ylipainekokeissa saadut mittauksista ovat varsin lähellä toisiaan. n<sub>50</sub>-lukujen osalta tulokset eroavat enintään 0,5 1/h toisistaan, joten kohteiden ilmavuotoluvut voidaan antaa ali- ja ylipainekokeen keskiarvoina [1].

#### 4.1 Laitteiston soveltuvuus koko portaan mittaukseen

Blower Door -laitteiston valmistaja antaa puhaltimen vapaan virtauksen maksimikapasiteetiksi 10 700 m<sup>3</sup>/h ja 50 Pa:n paine-eroa se pystyy pitämään yllä enintään 9 000 m<sup>3</sup>/h:n virtauksella [6]. Tämän voi ajatella myös niin, että 50 Pa:n paineeseen päästään tilavuudeltaan 9 000 m<sup>3</sup>:n rakennuksessa, jonka ilmapuotoluku on 1. Nyt mitatut kerrostalot tai niiden osat ovat olleet tilavuudeltaan tyypillisesti 4 000 – 5 000 m<sup>3</sup>:n suuruusluokkaa ja suurimman kohteen tilavuus oli n. 10 500 m<sup>3</sup>. Kun ilmapuotoluku on jäänyt reilustikin alle yhden, on laitteiston kapasiteetti riittänyt hyvin. Suurissa kerrostaloissa liikutaan kuitenkin suorituskvyn ääri rajoilla.

#### 4.2 Mittauksissa havaittuja ongelmia

Suurin osa ongelmista on liittynyt käytännön järjestelyihin ja valmistelevien töiden suoritukseen. Joissakin tapauksissa vaipan tiivistäminen on ollut kesken, työmaalla ei ole ollut tietoa ilmanvaihtojärjestelmien toiminnasta ja jopa ikkunoita tai ovia on saattanut puuttua. Näistä tapauksista on todettava, että summittainen ilmoitus painekokeen tekemisestä tietynä päivänä ei riitä: vastuullisen työnjohdon on ymmärrettävä mittauksen reunaehdot ja sitouduttava niiden täyttämiseen. Yksi keino voisi olla laatia kattava kirjallinen ohje siitä, kuinka työmaalla valmistaudutaan painekokeen mittaamista varten.

Toinen ongelmaryhmä liittyy ilman kulkureittien sulkemiseen. Ilmanvaihtolaitteet tai niitä ympäröivät rakenteet voivat olla sellaisia, että tiivistäminen on vaikeaa, ellei mahdotonta. Yleensä ongelman pystyy kiertämään siirtämällä tiivistyspaikkaa esim. ilmavaihtokoneelta IV-venttiileille tai poistoputken päähän tai teippaamalla jätesäkkien avulla suuremman alueen tiivistettävän paikan ympärillä.

Ikkunoihin, oviin ja luukkuihin, jotka on asennettu ja tiivistetty lopulliseen tilaansa, ei pitäisi enää kajota väliaikaisiin lisätiivisteihin. Joskus ne kuitenkin voivat olla huonojen tiivisteiden, huonon sovituksen tai vääntymisen vuoksi niin hataria, että ilmapuoto vaikuttaa tulokseen ja jopa hankaloittaa kokeen suoritusta. Tällaisia kohtia pitää tiivistää harkintaa käyttäen ja niistä on tehtävä merkintä mittauspöytäkirjaan.

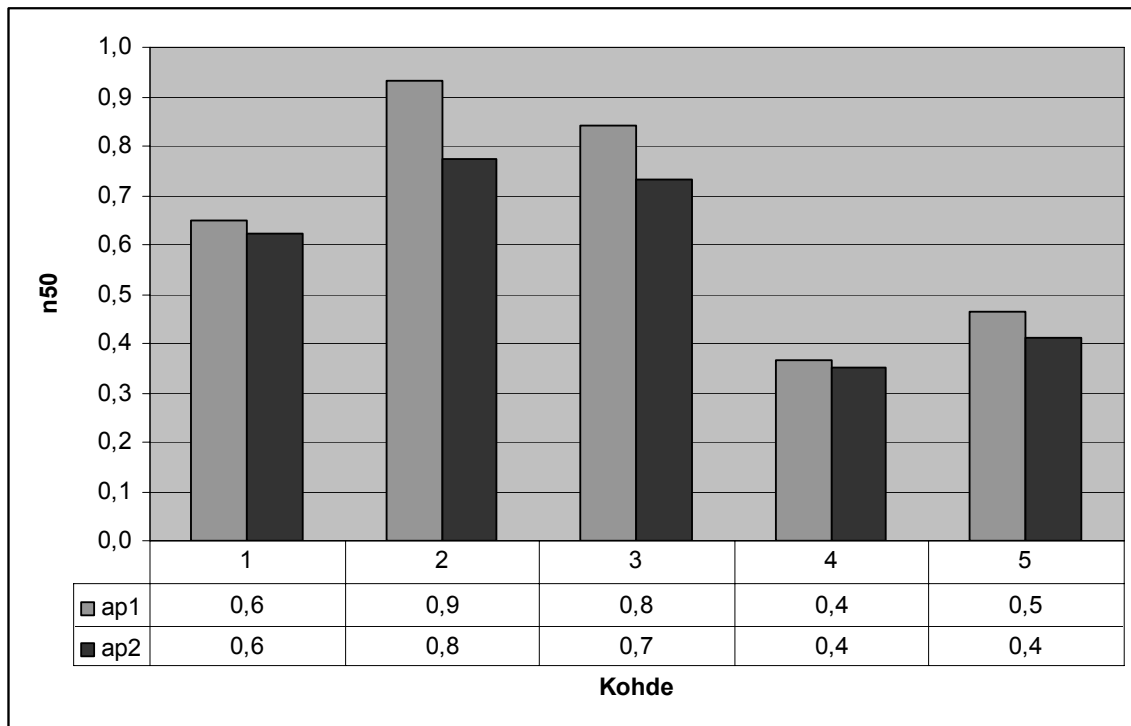
Tilanteen sanelemat tiivistämiskäsitukset ovat yleensä teknisesti aivan käyttökelpoisia, mutta niiden rakentaminen voi lisätä valmisteluun kuluvaan aikaan huomattavastikin. Ääritapauksissa voidaan joutua rajaamaan mitattavaa aluetta niin, että tiivistyskelvoton rakenneosa jää sen ulkopuolelle.

Nyt suoritetuissa mittauksissa vain yhdessä kohteessa törmättiin ongelmiin varsinaisessa mittauksen suorituksessa. Laitteisto ei kyennyt tasaamaan paine-eroa niin, että paine olisi pysynyt riittävän tasaisena mittaamista varten. Selvää syytä paineen heittelyyn ei voitu osoittaa, mutta eräitä mahdollisia syitä löydettiin. Kohde oli useampiportainen kerrostalo, josta yhtä porrasta mitattiin. Toisin kuin yhden portaalan taloissa, tässä mittausaluetta rajaavaa vaippaa ei kaikilta osin voitu tarkastella. Mm. alakattojen taakse saattoi jäädä ilman vuotoreittejä, jotka eivät vaikuttaneet koko rakennuksen tiiviyteen, mutta estivät porraskohtaisen mittauksen onnistumisen. Mitattavan alueen rajaus jouduttiin tekemään paikoitellen niin, että rajaava seinä saattoi olla huokoinen harkkoseinä, joka vuosi ilmaa lävitseen. Lopuksi mittausalueella oli peräti kuusi sisäänkäyntiä, joita ei voitu lukita mittauksen ajaksi ja niin ollen vielä vilkkaalla työmaalla hallitsematonta läpikulkua tapahtui jatkuvasti. Kohteen ilmanpitävyyttä voitiin arvioida karkeasti niin, että laitteisto asetettiin hakemaan 50 Pa:n alipainetta, jolloin painelukemat liikkuvat 40 ja 60 Pa:n välillä. Paineen osuessa 50 Pa:n kohdalle merkittiin manuaalisesti muistiin näytöllä

näkyvä ilman tilavuusvirran lukema. N. 20 lukemasta otettiin keskiarvo, jonka perusteella ilmavuotoluku laskettiin. Mittaustapa ei kuitenkaan ole standardin SFS-EN 13829 [4]. mukainen eikä luotettava, joten kohde jätettiin pois lopullisista mittaustuloksista.

### 4.3 Mittaustapojen vertailua

Viidessä tutkitussa kohteessa tehtiin tavanomaisten ali- ja ylipainekokeiden lisäksi alipainemittaus niin, että asuntojen ulko-ovet olivat kiinni, mutta postiluukut oli tuettu auki. Koekohteessa 6 tätä vertailumittausta ei tehty. Tämän vertailumenetelmän avulla haluttiin varautua esim. seurantamittauksiin, joissa talo on jo asuttu ja asuntojen ovien auki pitäminen mittauksen aikana on hankalaa. Tulokset on esitetty kuvassa 3, jossa vasemmanpuoleinen pylväs "ap1" edustaa normaalia alipainemittausta ja oikeanpuoleinen "ap2" vertailumittausta ulko-ovien postiluukkujen ollessa auki. Voidaan todeta, että erot ovat varsin pieniä, vain yhden kymmenyksen luokkaa, joten mittausten menetelmiä voidaan käyttää tarpeen vaatiessa rinnakkain, kun kerrostalon ilmavuotoluku on  $\leq 1,0$  1/h.



Kuva 3. Ilmavuotolukujen vertailu, kun alipainemittaus tehdään joko asuntojen ulko-ovet avoinna (ap1) tai ulko-ovet suljettuna ja postiluukut avoinna (ap2).

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on toteutettu laaja tutkimus "Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous AISE", jossa tehtiin painekoe mm. 56 uudehkolle asunnolle 16 eri kerrostalossa. Asuntokohtaisissa mittauksissa todettiin, että keskimääräisen asunnon ilmavuotoluku oli 1,6 1/h ja tulosten vaihteluväli 0,3 – 5,3 1/h. 49 % kohteista saavutti alle 1 1/h:n ilmavuotoluvun. Yhdessä kohteessa määritettiin ilmavuotoluku sekä koko portaalle mittauksena että kolmen ko. portaalle sijaitsevan asunnon mittauksena. Koko portaalle tulos oli 0,9 1/h ja kolmen mitatun asunnon tulokset 1,3, 4,3 ja 1,7 1/h [7]. Tässä kohteessa asuntokohtaiset mittaustulokset olivat siis heikompia kuin koko portaalle mittaustulokset. Nyt tehdyissä koko portaalle mittauksissa ilmavuotoluvun  $n_{50}$  keskiarvo oli 0,7 1/h ja vaihteluväli 0,4 – 1,0 1/h. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tehty asuntokohtaisia vertailumittauksia. Erot asuntokohtaisten ja koko portaalle mittaustulosten välillä voivat johtua

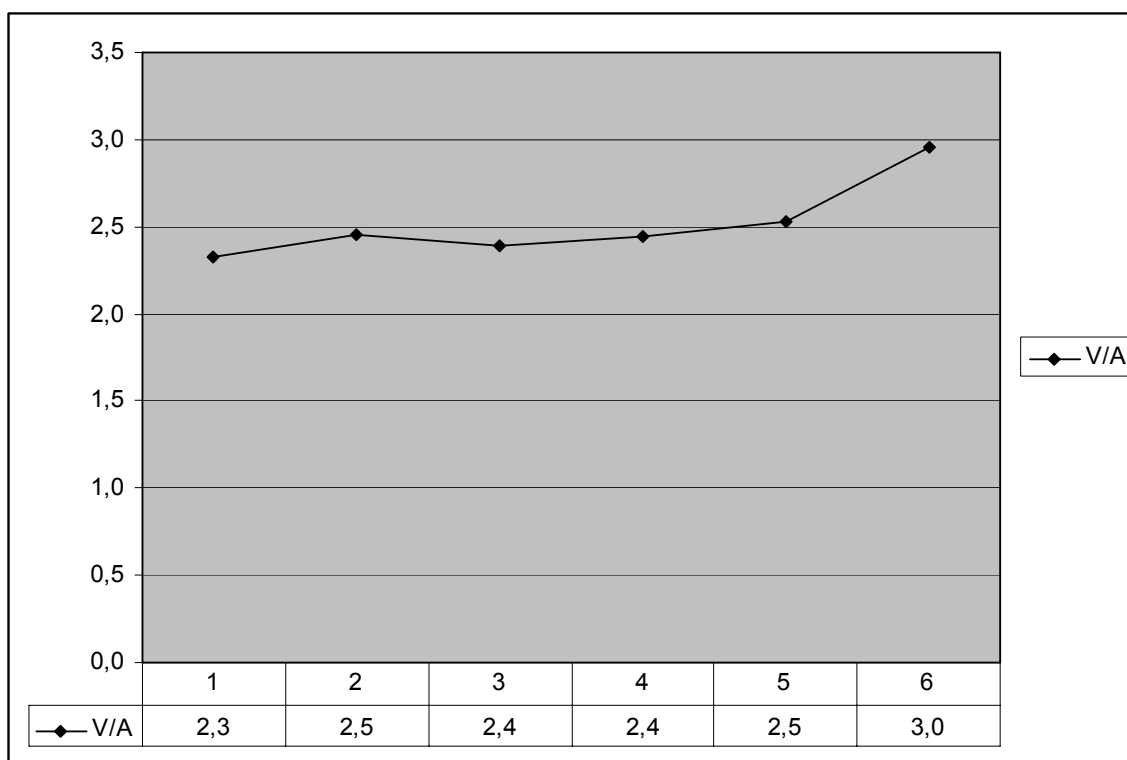


mm. siitä, että asuntojen ilmapuotoluvuissa ei eritellä ulkovaipan vuotoja huoneistojen välisistä vuodoista. Tällöin rakennuksen sisäisten rakennusosien vuodot voivat heikentää asuntokohtaisia mittaustuloksia.

#### 4.4 Tilavuuden ja vaipan pinta-alan suhteen vaikutus

Asuntokohtaisten ja koko portaan mittaustulosten erot voivat johtua myös mitattavan alueen sisätilavuuden ja vaipan sisäpinta-alan suhteen muutoksista. Yleensä rakennuksen sisätilavuuden kasvaessa myös sisätilavuuden ja vaipan sisäpinta-alan suhde  $V/A_E$  kasvaa. Tämä voidaan todeta myös tutkituissa kohteissa, jotka on esitetty kuvassa 4 tilavuuden mukaan järjestettynä.

Asuntokohtaisissa mittauksissa suhde  $V/A_E$  on tyypillisesti välillä 0,7 – 1,5, joten se on merkittävästi pienempi kuin koko portaan tai koko rakennuksen mittauksissa. Suhteen  $V/A_E$  kasvu pienentää  $n_{50}$ -lukua, vaikka vaipan ilmanpitävyys ei paranekaan, koska  $n_{50}$ -luku riippuu rakennuksen tilavuudesta. Tämä on havaittu mm. AISE-tutkimuksessa kivi- ja hirsirakenteisten pientalojen ilmanpitävyysmittauksissa [7].



Kuva 4. Sisätilavuuden ja vaipan sisäpinta-alan suhde tutkituissa kohteissa.

Rakennuksen ilmapuotoluku voidaan määrittää tilavuudesta riippuvan  $n_{50}$ -luvun lisäksi myös  $q_{50}$ -lukuna, joka lasketaan  $n_{50}$ -luvusta seuraavasti:

$$q_{50} = n_{50} \cdot \frac{V}{A_E} \quad (1)$$

Edellä kuvatun  $V/A_E$ -suhteen muuttumisen vuoksi  $q_{50}$ -luvun voidaan katsoa kuvaavan paremmin rakennuksen ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä suuremmissa rakennuksissa kuten juuri kerrostaloissa. Ilmanpitävyyden mittaustuloksena olisikin suositeltavaa ilmoittaa sekä  $n_{50}$ - että  $q_{50}$ -luku.

Verrattaessa tutkimuksessa mitattujen kerrostalojen  $q_{50}$ -lukuja toisiinsa nähdään, että tässä tapauksessa tilavuudeltaan suuremmissa kohteissa vaipan ilmanpitävyys on ollut myös todellisuudessa parempi (ks. taulukko 1). Näin ollen  $n_{50}$ -lukujen pieneneminen on johtunut tässä tapauksessa lähinnä tästä asiasta eikä niinkään suhteen  $V/A_E$  kasvusta.

## 5. Yhteenveto

Rakentamisen energiankulutusmääräysten jatkuvasti kiristyessä myös ilmanpitävyyden merkitys korostuu rakennuksen energiatehokkuudessa. Hyvän ilmanpitävyyden tavoittelemisen lisäksi myös kerrostalojen ilmanpitävyydsmittauksia lähivuosina. Standardien ja määräysten lisäksi tarvitaan myös kokemuksen myötä karttuvaa tietoa hyvistä käytännön ratkaisuista, jotka mahdollistavat luotettavan ja vertailukelpoisen tutkimustiedon tuottamisen.

Pientalojen ilmanpitävyyttä on tutkittu jo pitkään ja siihen liittyvät ilmiöt tunnetaan jo jokseenkin hyvin. Kun mittaustietoa kerrostaloista kertyy lisää ja otokset suurenevät, pystytään tarkastelemaan paremmin myös edellä esitettyjä ilmiöitä ja vertaamaan niitä jo tunnettuun tietoon.

## Lähdeluettelo

- [1] RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustieto Oy. 24 s.
- [2] RakMK D3. 2007. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 10 s.
- [3] RakMK D3. 2008. Rakennuksen energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 14 s.
- [4] SFS-EN 13829: 2000. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). Suomen standardisoimisliitto. 23 p.
- [5] RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 72 s.
- [6] Esite: Minneapolis Blower Door™, Building Airtightness Testing Systems. <http://www.energyconservatory.com/products/products1.htm>, viitattu 7.10.2009.
- [7] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 140. 148 s. + 19 liites.

# Calculating Potential Freedom from Structural Damage of Thermal Insulation Structure in Timber-Built Systems

Jens-Lüder Herms  
MOLL bauoekologische Produkte GmbH

## Abstract

The present document describes how structural damage may arise in thermal insulation systems and how such systems may be reliably and safely protected from damage of this kind.

## 1. Introduction

Structural damage occurs when the moisture stress on a structural system is greater than the system's drying capacity. To prevent structural damage, the usual approach is to concentrate on reducing moisture stress. However, structural systems cannot be fully protected from the effect of humidity or moisture. Planned moisture stress produced by diffusion is virtually never the cause of structural damage, the usual culprit being unanticipated moisture stress that cannot be entirely ruled out by building design. To exclude the likelihood of structural damage and mould growth, it is advisable, apart from considering moisture stress, to concentrate on the drying capacity of a structural system. Systems with a high drying capacity and a simultaneous reduction in moisture stress, as provided by vapour membranes with a variable  $s_d$  value, are still very safely and reliably protected against structural damage even if subjected to unanticipated moisture stress.

## 2. Condensation - Dew Point - Quantity of Condensation

Thermal insulation in timber-built structural systems separates warm indoor air with its high humidity content from cold outdoor air with low absolute humidity. When warm inside air penetrates the structure, it cools - in wintry weather conditions outdoors - as it passes on its way through the structural system. Moisture may condense in the process, this precipitation of water being attributable to the physics of airborne humidity. Warm air can absorb more moisture than cold air. At a greater internal relative humidity (e.g. 65%), the dew-point temperature rises and, as a direct consequence, the quantity of condensation increases as well (see figure 1).

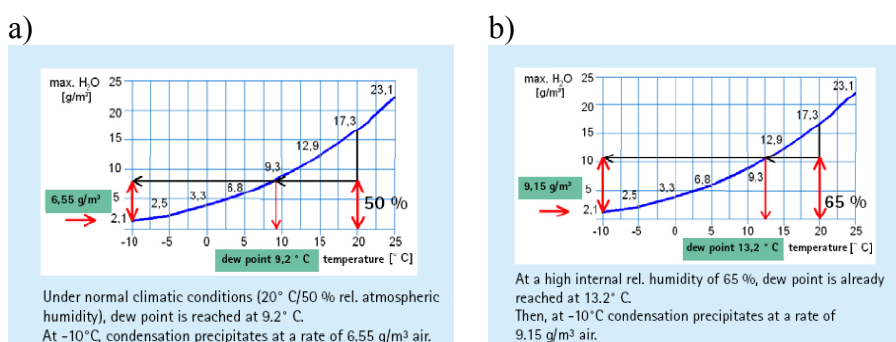


Figure 1. a) Development of condensation at 50 % relative atmospheric humidity.  
b) Development of condensation at 65 % relative atmospheric humidity.

Condensation develops whenever a more diffusion-tight layer of building components is below the dew-point temperature, which means that: Building-component layers which are more diffusion-tight on the outside of the thermal insulation than the layers on the inside are unsatisfactory. A major problem is posed should warm air leak into the structure by convective stream, which happens as a result of leaks in the air seal. Building components are deemed very open to diffusion when their  $sd$  value is less than 0.20 m (<1 MNs/g). The  $sd$  value is defined as the multiple of the vapour diffusion resistance coefficient ( $\mu$  value) - as material constant - and the thickness of the component in metres:  $sd = \mu \times s$  (m)  $sd \times 5.1 = mvtr$  (MNs/g)

A low  $sd$  value can thus be obtained by means of a low  $\mu$  value and a greater layer thickness (e.g. wood fibre board), or by a higher  $\mu$  value and a very small layer thickness (e.g. roofing felts). Water vapour is influenced in the first place by the  $\mu$  value, and only then by the thickness of the building material. This means that precipitation of condensation begins earlier at a higher  $\mu$  value than at a low one. Moreover, roofing felts produce only a low drop in vapour pressure because there is little or no difference in temperature and humidity. This explains why structural damage may still occur with diffusion-open roofing felts when the flow of moisture in the building component is high. Roofing felts with non-porous, permeable membranes such as SOLITEX UD and SOLITEX PLUS are advantageous in this context, as diffusion proceeds actively along the molecular chains rather than passively through pores. Once water has condensed in a structural system, hoarfrost or even ice may develop underneath the roofing felt in cold winter conditions. Water and ice are impervious to water vapour and can cause an insulating sheet to act as a vapour barrier on the outside. Structural units with a diffusion-inhibiting or even a diffusion-tight layer on the outside are more exacting in terms of construction physics than building-component layers that are open to diffusion towards the outside. Diffusion-tight structural systems include steep-pitched roofs with diffusion-inhibiting underlay, e.g. bitumen felts, roofs with flexible metal sheeting, flat roofs and green roofs.

## 2.1 Moisture stress in structural systems

There are several different reasons for moisture stress within a thermal insulation system when building with timber. In the first place, water may penetrate through a leaking roof skin. Large volumes of moisture can develop, causing water to drip into the accommodation area. Minor leaks can lead to creeping moisturisation, which is often accompanied by mildew or mould on the materials contained in the structural system. A structural system may also be subjected to moisture stress from the inside, due to foreseeable or planned moisture stress:

- diffusion processes

Unanticipated moisture stress:

- convection, i.e. air flow (leaks in the air barrier)
- heightened moisture in the building components used
- design-induced transport of moisture (e.g. flank diffusion through adjoining masonry)

## 2.2 Moisture Stress through Diffusion

The smaller the amount of moisture that can penetrate a structural system, the greatly reduced risk of structural damage is. At least that used to be the perceived opinion. In other words, very dense vapour barriers would prevent damage to the building. The fact that this is not actually true was already proven some ten years ago, by construction-physics calculations on the occasion of the market launch of pro clima's DB+ with its  $sd$  value of 2.30 m (12 MNs/g). Furthermore, investigations on outside walls conducted in North America in 1999 [1] demonstrated that the

entry of moisture through a vapour barrier as a result of convection, even where professionally installed, produces a condensation quantity of about 250 g/ m<sup>2</sup> per dew period. That corresponds to the quantity of condensation diffusing through a vapour membrane with an sd value of 3.3 m (16.5 MNs/g) during one winter [2].

### 2.3 Moisture Stress through Convection

Convection, in other words airflow, transports substantially larger quantities of moisture into a structural system than diffusion does. The volume of moisture carried in by convection can easily exceed a thousand times the quantity introduced by diffusion.

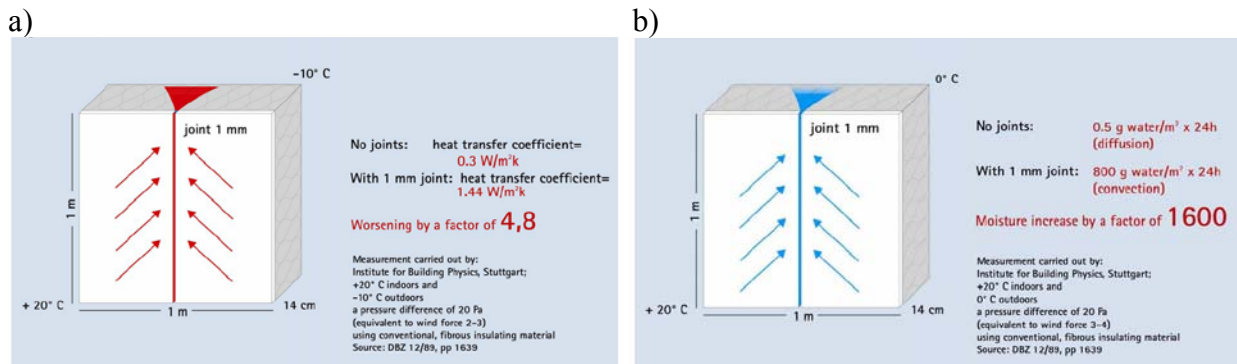


Figure 2.

Once condensation develops convective quantities of moisture can, due to their high moisture load, present a risk to the outside even where building components are open to diffusion. Waterfilms can act as a vapour barrier in the same way as ice. Such a situation generally results in structural damage similar to where structural systems have diffusion-tight components on the outside.

### 3. Drying towards the inside

Drying towards the inside is another important option for structural components. Whenever the temperature of an insulation layer is higher outside than inside, the diffusion stream reverses and moisture streams inwards out of the component. This can happen on sunny days in spring and autumn and all the more so during the summer months. If a vapour-membrane or airtightness layer were then to be open to diffusion, moisture that may be present in the interior. However, a diffusion-open vapour membrane would let too much humidity diffuse into the structural system during winter and thus give rise to structural damage. A structural system would appear at first glance to be well protected against moisture when equipped with vapour membranes. However, if moisture enters through convection, flank diffusion or high component moisture, the system is incapable of evaporating again towards the inside in the summer. Depending on its design, the vapour membrane becomes a moisture trap. A vapour membrane with a high diffusion resistance in winter and a low diffusion resistance in summer is ideal. „Intelligent“ vapour membranes with a humidity-variable sd value have proven their worth for years by now. They alter their diffusion resistance in relation to the relative atmospheric humidity. In winter conditions, they become more diffusion-tight and protect the structural system from moisture. In summer, they are more diffusionopen and thus allow moisture, which may be present in the system to evaporate towards the inside.

### 3.1 How Humidity-Variable Diffusion Resistance Works

The direction of the diffusion stream is determined by the difference in water vapour partial pressure, which depends on the temperature and humidity content of the air inside and outside a building. Just to concentrate on the temperature aspect, moisture streams from the warm side to the cold side, so, in winter, from the inside to the outside, and, in summer, from the outside to the inside. Measurements on roof systems have shown that, in winter, the transport of moisture within the roof space towards the outside leaves the vapour membrane at a mean ambient humidity of about 40 %. In summer, on the contrary, moisture in the roof space produces increased relative atmospheric humidity at the vapour membrane, sometimes even producing ‘summer condensation’ (see figure 3).

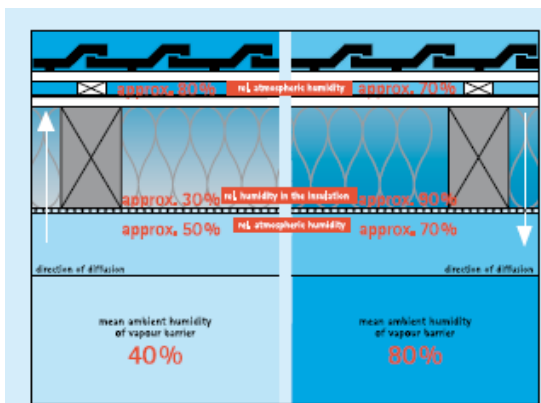


Figure 3. Seasonal dependency of relative atmospheric humidity at the vapour membrane.

Vapour membranes having a humidityvariable diffusion resistance are tighter to diffusion in a dry environment and more open to diffusion in a humid environment. pro clima DB+ has proven its worth in millions of square metres installed since 1991, its diffusion resistance ranging from 3.5 to 0.8 m (16.5 to 4 MNs/g). Moll bauökologische Produkte GmbH developed their pro clima INTELLO® high-performance vapour membrane in 2004. INTELLO® has the world’s most effective humidity-variable diffusion resistance, ranging from 0.25 m to over 10 m (1.25 to over 50 MNs/g) to suit every type of climate.

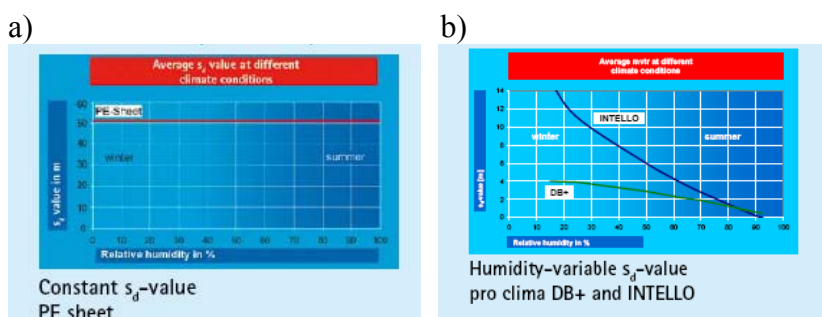


Figure 4. a) Diffusion graph for a PE sheet. No humidity variability. b) Diffusion graph pro clima DB+ and INTELLO. Medium and high variability.

### 3.2 High Diffusion Resistance in Winter

The diffusion resistance of the pro klima INTELLO© vapour membrane has been designed so that the membrane can provide a s<sub>d</sub> value of over 10 m (50 Ns/g) in winter conditions. As a result, the vapour membrane will allow almost no moisture to penetrate a structural system during winter,

when humidity pressure on the system is at its highest. The same can also be said of extreme climatic conditions as encountered in alpine regions, where winters are cold and long. Effective protection against humidity is also provided for roofs with diffusion-tight underlay sheeting (e.g. bitumen sheeting), and roofs with flexible metal sheeting. In roofs with diffusion open sub roofs, the high  $s_d$  is an obvious advantage in case of hoarfrost and ice formation (= diffusion barrier) on diffusion-open insulation sheeting. (see figure 4b)

### 3.3 Lower Diffusion Resistance in Summer

Diffusion resistance in summer can be reduced to an  $s_d$  of 0.25 m (1.25 MNs/g) permitting moisture that may be present in the roof system to evaporate rapidly towards the inside. Depending on the magnitude of the vapour pressure difference, this corresponds to an evaporation rate of 5 to 12 g/m<sup>2</sup> of H<sub>2</sub>O per hour corresponding to approx. 80 g/m<sup>2</sup> of H<sub>2</sub>O per day or 560 g/m<sup>2</sup> of H<sub>2</sub>O per week. (see figure 3) This high evaporation capacity means that a building component framework will start drying out rapidly by as early as spring.

## 4. Various Methods of Calculating Moisture Transports

Drying reserves are the consequence not only of diffusion processes, but also of sorption and capillarity processes within the building-component layers.

### 4.1 Calculation according to Glaser EN ISO 13788

EN ISO 13788 still relies heavily on Glaser's method, which calculates ensuing quantities of condensation in structural systems under the assumption of a monthly block climate:

### 4.2 Calculation of Coupled Heat and Moisture Transport under Natural Climatic Conditions

The Glaser method provides an approximation for the assessment of structural systems, but does not represent reality. On the one hand, the block climate data differs from the real climate, and, on the other hand, such important transport mechanisms as sorption and capillarity are not taken into account. EN ISO 13788 therefore points out that this method is not suitable as means of verifying the freedom of green roof systems from structural damage, in which case heat and moisture transport has to be calculated by means of a non-transient simulation program. Recognised software solutions in this area are Delphin by the Institut of Building Climatology in Dresden and WUFI by the Fraunhofer Institute of Building Physics in Holzkirchen. These programs calculate the coupled transport of heat and moisture in multiple-layer building components under natural climatic conditions, jointly allowing for temperature and humidity, light absorption, wind, latent heat, sorption and capillarity. The programs have been validated repeatedly, which is to say the result of their computations have been compared with those of field trials. Actual weather data over the period of 1 year is required here for hourly values. Climatic data is available from throughout the world, viz. Europe, North America and Asia, including both temperate and extreme climatic regions. To carry out a normal simulative calculation of the coupled transport of heat and moisture under natural climatic conditions, the building structure with its sequence of layers is entered into the program, and heat and moisture stream are analysed over a period of several years under boundary conditions closely conforming to reality. The result then shows if moisture has accumulated in the structure, i.e. whether the overall moisture content of the structural system has risen over the period under observation, or if the component has remained

dry. However, it is not possible by this method to recognise the drying reserves of a structural system.

### 4.3 Calculating the Potential Freedom from Structural Damage for a Structural System

One further input is used in order to calculate how reliably and safely protected a structural system is against unanticipated entry of moisture, e.g. as a result of convection, flank diffusion, or heightened incorporated humidity: The thermal insulation is moisturized at the beginning of the calculation, and the rate at which this moisture dries out is duly examined. The quantity of moisture that dries out of the structural system in relation to the extra moisture added to it represents the safety potential from structural damage of the system before it will suffer structural damage. Using various vapour membranes, calculations are performed on several structural systems deemed difficult from the construction physics point of view: under adverse conditions (north side), in different climatic zones (lowlands and alpine), with various forms of roofs (steep-pitched, flat, green). Less sophisticated systems in terms of construction physics naturally offer even greater levels of safety potential.

### 4.4 Roof structures

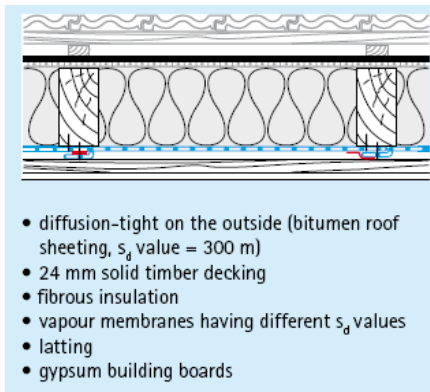


Figure 5. Roof structure.

#### Vapour barriers:

- PE sheet  $s_d$  value/mvtr constant 50 m (25 MNs/g)
- Vapour Membrane  $s_d$  value/mvtr constant 2.3 m (12MNs/g)
- pro clima DB+  $s_d$  value/mvtr humidity-variable 2.3 m: 3.5-0.8 m (12: 17-4 MNs/g)
- pro clima INTELLO®  $s_d$  value/mvtr humidity-variable 7.5 m: 10-0.25 m (38: 50-1.25 MNs/g)

#### Roof variants:

- steep-pitched with 40° pitch to north side, red clay roof tiles

#### Location:

- Holzkirchen, Germany, altitude above mean sea level = 680 m

#### Calculation

- using WUFI 3.3 pro [10]
- initial moisture in thermal insulation: 4,000 g/m<sup>2</sup>

One important factor in determining protection against structural damage and mould growth is the back-diffusion capacity in summer and, associated therewith, the ability of the structural system to evaporate towards the inside. Back-diffusion can occur when the partial vapour



pressure on the outside of the insulation is greater than on the inside, or to put it more simply, when the temperature at the outside of the insulation is higher than in the living area. The ruling temperature in this context is that recorded at the outside of the insulation, not that on the surface of the roof. This means it is essential to allow for the time it takes for the heat to penetrate the layers above the insulation. The heat penetration time is shorter for a steep pitched roof than for a flat one with gravel layer, or even a green roof. Flat roofs without gravel, for instance, have greater safety reserves than north facing steep-pitched roofs. The temperature at the outside of the insulation is influenced by surrounding air temperature and by exposure to sunlight.

#### 4.5 Climatic Data: Holzkirchen Location

Holzkirchen lies between Munich and Salzburg at 680 m above sea level. The climate is characteristically harsh and cold. The following diagrams show the temperature curve over one year. The blue line indicates inside temperature, and the red bars represent outside temperature

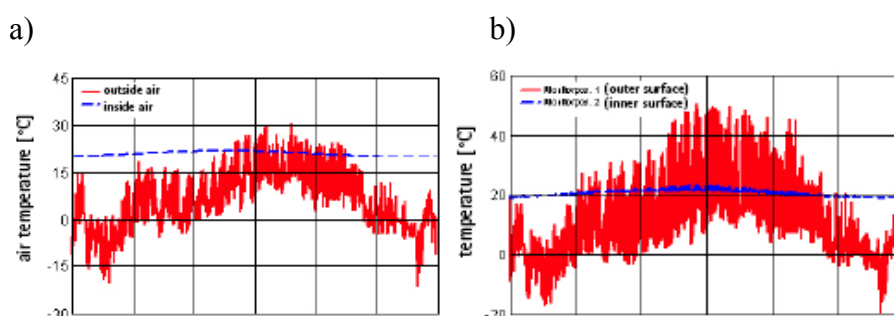


Figure 6. a) Air temperature. b) Roof surface temperature, north side, 40° roof pitch.

Taking solar and global radiation into account, roof-surface temperature is occasionally substantially higher than the air temperature. As a result, backdiffusion is feasible in Holzkirchen on many days of the year even in the north-facing direction, and even on sunny days in winter on the southfacing side. We based our own calculation on the least favourable situation, i.e. a 40° pitched roof facing north. The chosen calculation period was ten years.

#### 4.6 Potential Freedom from Structural Damage - Steep-Pitched Roof in Holzkirchen, North Side, 40° Roof Pitch

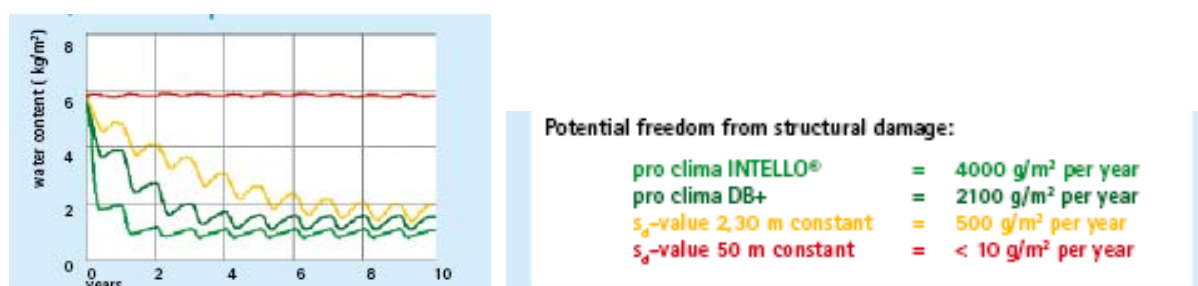


Figure 7. Course of drying under excess moisture, steep-pitched roof, north side, 40° roof pitch.

The evaporation rate of the initial moisture, assumed to be increased, defines the structural system's potential freedom from structural damage in relation to unanticipated moisture (convection, flank diffusion, etc.). It can be seen that the PE sheet does not allow the structural system to dry out. Moisture present in the system can no longer escape. A vapour membrane having a constant  $s_d$  value of 2.30 m (12 MNs/g) does provide us with a structural system that functions well under the laws of construction physics, but the system's drying reserves are

minimal. The structural system equipped with pro clima DB+ evaporates considerably faster and possesses substantial safety reserves. The high-performance INTELLO® vapour membrane offers the greatest degree of safety potential of the structural system. Within one year, the system, according to the WUFI 3.3 pro [10] computation, can be moisturized with 4,000 g/m<sup>2</sup> of water p.a. without suffering structural damage.

#### 4.7 Climatic Data - Davos Location

Davos is situated 1,560 m above sea level and therefore enjoys an alpine climate. The following diagrams show the temperature curve over a period of one year. The blue line indicates indoor temperature and the red bars represent outside temperature.

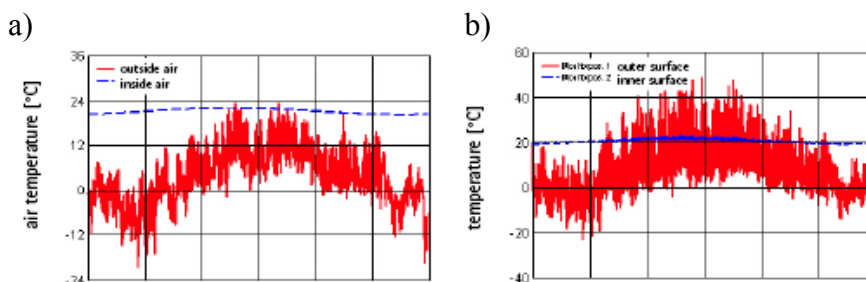


Figure 8. a) Air temperature. b) Roof surface temperature, north side, 40° roof pitch.

Simply observing the air temperature in Davos, the outside temperature is higher than the inside temperature on only a very few days of the year. Taking solar and global radiation into account, roof-surface temperature is higher than the air temperature. On the north-facing roofs, however, temperatures are substantially lower than in Holzkirchen, back-diffusion being feasible only on a few days of the year. The south-facing roofs in Davos reached almost the same temperatures as in Holzkirchen. Night-time temperatures during winter are specific to alpine regions, being substantially lower. To minimise the effect of solar radiation, we once again based our calculation on the least favourable situation, i.e. a north-facing roof with a 40° pitch.

#### 4.8 Potential Freedom from Structural Damage - Steep-Pitched Roof in Davos, North Side, 40° Roof Pitch

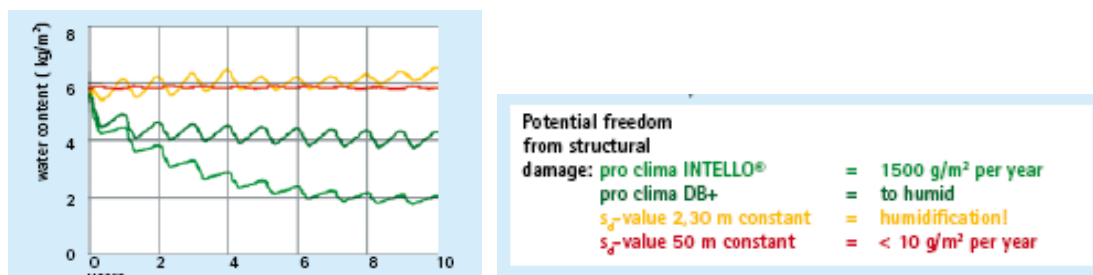


Figure 9. Potential Freedom from Structural Damage – Steep-Pitched Roof in Davos, North Side, 40° Roof Pitch.

The extremely low temperature in winter gives rise to the high precipitation of condensation, so that, even where there is assumed to be no unanticipated moisture stress, a structural system becomes damp despite being equipped with PE sheet. Saturation occurs very rapidly in the presence of a vapour membrane having a constant s<sub>d</sub> value of 2.30 m (12 MNs/g). Even pro clima DB+ is incapable of keeping the structural system dry. The high-performance INTELLO® vapour membrane is the only membrane which provides the structural system with the perfect

answer in terms of construction physics, while also providing it a higher safety potential. Within one year, according to the WUFI computation, the system can take as much as 800 g/m<sup>2</sup> extra of water without suffering structural damage.

#### 4.9 Conclusions in Respect of Roof Structures

pro clima DB+ and INTELLO® provides roof systems with the highest degree of safety in respect to freedom from structural damage, even in the presence of additional moisture as a result of unanticipated influencing factors. Over the past 10 years, pro clima DB+ has built up a track record of several million square meters of successful solutions free from structural damage. Using INTELLO® in conjunction with externally, diffusion-tight steep pitched roofs and flat roofs with gravel in alpine regions show sufficient potential for freedom from structural damage

### 5. Summary

Structural systems using DB+ and INTELLO® have extremely high safety reserves, thus preventing structural damage and mould. Even where moisture stress is unanticipated, or where it is unavoidable in normal building practice, the high drying reserves of these humidity-variable safety vapour membranes provide structural systems with a very high potential freedom from a structural damage. The high-performance INTELLO® vapour membrane has the world's most effective humidity-variable diffusion resistance in any climatic zone, offering thermal insulation systems the utmost in safe protection - whether the structural system is open to diffusion on the outside, or presents a more challenging example of construction physics like a flat roof, green roof, roof with diffusion-tight underlay, or flexible metal sheet roof. INTELLO® performs effectively under extreme climatic conditions too, like those encountered in alpine regions for example. The proven pro clima DB+ provides a high degree of safety for roof systems up to medium altitudes (e.g. Holzkirchen location). Conforming to DIN Standard 68 800-2, chemical wood preservatives need not be used where humidity-variable vapour membranes are installed. pro clima offers a six-year system warranty to provide even greater safety and protection. Once again, with the vapour membranes and airbarrier INTELLO® and DB+, the pro clima safety rule is once more put into practice,

**„The greater a structural system's reserves for evaporating, the greater the unexpected moisture stress it can absorb and still remain free from structural damage“.**

pro clima's „Inside Sealing“ brochure contains further information on working with and installing this product. Contact pro clima's technical „hot line“ on  
Tel: +49(0)62 02 - 27 82 45 - Fax: +49(0)62 02 - 27 82 51 - email: [technik@proclima.de](mailto:technik@proclima.de)

or our partner in Finland:

TIIVISTALO - T +358 (0) 207 439 670 - F +358 (0) 207 439 679 - [info@tiivistalo.fi](mailto:info@tiivistalo.fi) - [www.tiivistalo.fi](http://www.tiivistalo.fi)

## References

- [1] TenWolde, A. et al.: "Air pressures in wood frame walls, proceedings thermal VII." Ashrae Publication Atlanta, 1999
- [2] IBP Mitteilungen 355: „Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?“
- [3] Deutsche Bauzeitung; Heft 12/89 Seite 1639ff
- [4] DAB 1995; Seite 1479; Heft 8
- [5] Klopfer, Heinz; Bauschäden-Sammlung, Band 11, Günter Zimmermann (Hrsg.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [6] Klopfer, Heinz; ARCONIS: Wissen zum Planen und Bauen und zum Baumarkt: Flankenübertragung bei der Wasserdampfdiffusion Heft 1/1997, Seite 8-10
- [7] H.M. Künzel; Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Diffusion durch angrenzendes Mauerwerk wksb 41/1996; Heft 37; Seite 34-36
- [8] WUFI 2D 2.1 (Wärme- und Feuchte instationär); PC-Programm zur Berechnung des gekoppelten 2-dimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen Fraunhofer Institut für Bauphysik Infos unter [www.wufi.de](http://www.wufi.de)
- [9] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung Beuth-Verlag, Berlin 07/2001
- [10] WUFI 3.3 pro (Wärme- und Feuchte instationär); PC-Programm zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen Fraunhofer Institut für Bauphysik

# Ilmavirtausten merkitys seinä- ja kattorakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa

Targo Kalamees ja Jarek Kurnitski  
Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos, LVI-tekniikka

## Tiivistelmä

Koska ilmavirtausten mukana voi rakenteeseen tuleva kosteuskuorma olla paljon suurempi kuin pelkän vesihöyryn diffuusion avulla rakenteeseen siirtyvä kosteuskuorma, on kosteuden konvektio yleensä aina kosteusteknisesti määräävä toimivuuskriteeri. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen kosteusteknistä toimintaa laboratoriomittauksilla täydessä mittakaavassa ja kaksiulotteisella laskennallisella tarkastelulla CHAMPS-BES ohjelmalla. Tulo-poistoilmavaihdon tapauksessa, missä tavanomaiset tulo-poistoilmamäärien erot ovat vähäisiä, oli paine-olosuhteiden hallitseminen ilmanvaihdon vaikeaa talon ilmanpitävyyden ollessa keskimääräinen tai hatara ( $n_{50} > 4$  1/h). Rakenteen kosteustekninen toimivuus voitiin varmistaa hyvällä ilmanpitävyydellä ja oikeilla materiaalivalinnoilla. Rakenteen ilmanpitävyys, tuulensuojan suuri vesihöyryläpäisevyys ja lämmönvastus paransivat ulkovaipan kosteusteknistä toimivuutta kosteuskonvektion kannalta. Suurempi kosteuskuorma, sisäinen ylipaine ja matalampi ulkolämpötila vaikeuttivat rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Kaksikerroksisen pientalon puurakenteisen ulkovaipan ilmanpitävyyden kriteerinä voidaan pitää kosteuskonvektion kannalta 10 Pa mitoituspaine-erolla 0,1 l/sm (kondenssia ei sallita) tai 0,2 l/sm (kondenssi  $< 0,5$  kg/m<sup>2</sup>), jos tuulensuojalla on suuri vesihöyryläpäisevyys ja lämmönvastus. Huolellisella työsuorituksella nämä vuotoilmamäärät ovat kohtuullisen helposti saavutettavissa. Sisäisten kosteuskuormien vuorokausivaihtelulla ei ollut vaikutusta ulkovaipan ulkokerrosten kosteuspitoisuuteen, mutta dynaaminen laskenta muuttuvilla ulko-olosuhteilla oli tarpeen mahdollisen vesihöyryn kondenssin osoittamiseksi.

## 1. Johdanto

Kosteustuotto sisätiloissa ja ilmanvaihdon toimivuus luovat sisäisen kosteuskuorman rakennuksen ulkovaipalle. Kylmässä ilmastossa sisäilman suurempi vesihöyrypitoisuus pyrkii tasoittumaan ulkoilmaan ja synnyttämään diffuusiovirran rakennuksen ulkovaipan läpi ulos. Höyrynsulun riittävä vesihöyryvastus estää vesihöyryn haitallisen diffuusion rakenteeseen ja rakenteessa. Kun sisäilman kosteuslisä on + 4...5 g/m<sup>3</sup> talvella, ulkoseinän sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde tulisi olla suurempi kuin 0...80:1 (riippuen rakennusmateriaaleista ja -ratkaisuista) [1], jotta rakenteet toimisivat kosteusteknisesti turvallisesti vesihöyryn diffuusion kannalta. Kosteuskonvektion kannalta rakenteet toimivat turvallisesti, jos kostean ilman virtaus rakenteeseen on pieni: rakennuksessa ei ole ylipainetta ja rakenteessa on ehjä ilmansulku. Mutta käytännössä rakennuksissa voi lähes jatkuvasti olla lattian korkeudella alipainetta ja katon korkeudella vastaavasti ylipainetta [2] ja sen lisäksi talot eivät ole ilmanpitäviä [3]. Koska ilmavirtausten mukana rakenteeseen tuleva kosteuskuorma voi olla paljon suurempi, kuin mitä ainoastaan pelkän vesihöyryn diffuusion avulla voi rakenteeseen siirtyä, on kosteuden konvektio yleensä aina kosteusteknisesti määräävä toimivuuskriteeri. Ilman ulosvirtaus sisätiloista rakenteen läpi kasvattaa olennaisesti puurunkoiseen rakenteeseen kertynyttä kosteutta [4]. Tutkimukset [5] ovat selvästi osoittaneet, että kosteuskonvektio voi aiheuttaa kosteusvaurioita siitakin huolimatta, että laskelmien mukaan rakenteiden standardien

mukaiset kondensoitumiskriteerit olisivat täyttyneet, jos ulkovaippa ei ole ilmanpitävä. Ilmavuoto riippuu rakenteiden ilmanläpäisevyydestä ja sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta. Paine-ero ulko- ja sisäilman välille muodostuu sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta, tuulesta ja ilmanvaihdon asetuksista. Paine-ero on erilainen rakennuksen eri osissa. Koska rakennuksien sisäinen ylipaine lisää ilman ulosvirtausta ja nostaa seinärakenteen kosteustasoa, on rakennus suunniteltava ulkoilmaan nähden alipaineiseksi. Poistoilmanvaihdon tapauksessa, kun korvausilmaventtiilejä ei ole asennettu riittävästi, tulee korvausilma asuntoihin vuotoina ikkunoiden ja ovien lisäksi myös alapohjan sekä muiden rakenteiden kautta. Suuri alipaine aiheuttaa tiettyihin paikkoihin keskittyneenä vetoa ja radonpitoisilla alueilla radonin kulkeutumista asuntoihin alapohjan vuotoilman mukana. Alipaineistus voi nostaa absoluuttiset itiöpitoisuudet haitallisen korkealle homevaurioituneissa rakennuksissa [7]. Kenttämittausten [8, 9] perusteella on myös havaittu selviä viitteitä siitä, että ryömintätilan mikrobit kulkeutuvat sisäilmaan. Jotta paine-erot vähentäisivät radonin ja muiden epäpuhtauksien siirtymistä esimerkiksi ryömintätalasta, pitää rakennus rakennusmääräysten mukaan olla ryömintätilaan nähden ylipaineinen. Se puolestaan lisää kosteuskonvektiosta johtuvaa riskiä.

Rakennuksien energiatehokkuusvaatimusten ja hyvän sisäilmaston tavoitteiden takia nykyään pientaloissa tulo-poistoilmanvaihto on lähes tyyppiratkaisu. Paine-olosuhteiden hallitseminen tulo-poistoilmanvaihdolla on vaikeaa talon ilmanpitävyyden ollessa keskimääräinen tai hatara ( $n_{50} > 4$  l/h). Tällöin 15 %:n ilmamäärien yli- tai alimitoituksella ei ole merkitystä [2]. Siksi Suomen pientaloissa voi lähes jatkuvasti lattian korkeudella olla alipainetta ja katon korkeudella vastaavasti ylipainetta ja oletus, että talot ovat alipaineisia, ei pidäkään paikkansa.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen kosteusteknistä toimivuutta kaksiulotteisella laskennallisella tarkastelulla ja laboratoriomittauksilla. Tarkasteltava liitoskohta valittiin kenttämittausten perusteella: ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessa on isoin ylipaine [2] ja tämä paikka on myös tyypillisin [10] ilmavuotopaikka suomalaisissa pientaloissa.

## 2. Menetelmät

### 2.1 Laboratoriomittaukset

Laboratorioon, kylmän- ja lämpimän kammion väliin rakennettiin kahden seinän, puurunkoisen seinän ja kevytbetoniharkkoseinän, liitos puurunkoisen yläpohja kanssa: Ko. rakenteita voidaan pitää tyypillisinä rakenteita suomalaisessa pientaloissa. Seinän ja yläpohjan liitos koostui 1,2 m × 0,7 m (leveys × korkeus) kokoisesta ulkoseinäkappaleesta ja 1,2 m × 0,9 m (leveys × pituus) kokoisesta yläpohjakappaleista. Lämpimässä kammiossa mallinnettiin sisäilman ja kylmässä kammiossa ulkoilman lämpötila ja kosteus. Lisäksi mallinnettiin kammioiden välinen paine-ero.

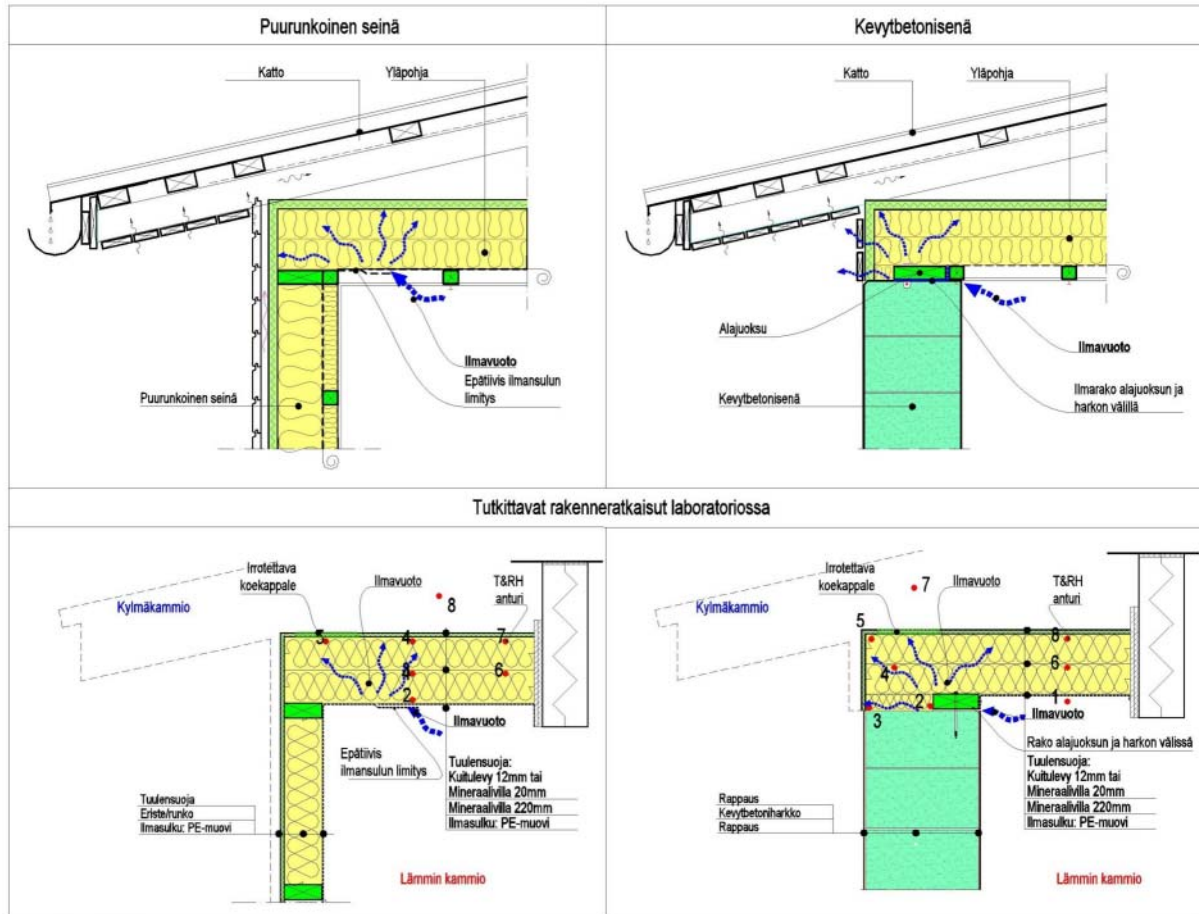
Yläpohja oli eristetty 220 mm:n paksuisella mineraalivillaeristeellä. Tuulensuojan vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan tutkittiin kahdella erilaisella tuulesuojavaihtoehdolla:

- 12 mm:n paksuinen puukuitutuulensuojalevy (kaksi ensimmäistä testisarjaa);
- 20 mm:n paksuinen Tyvek-pintainen mineraalivillatuulensuojalevy

Yläpohjan tuulensuojassa oli kaksi irrotettavaa koekappaletta, minkä avulla tarkasteltiin kondenssia tuulensuojan sisäpinnassa ja kuivatus-/punnituskokeen avulla rakenteeseen kertynyttä kosteutta.

Puurunko-seinän tapauksessa ilmavuotoa tapahtui rakenneliitoksen epätiivisiin ilmasulun limityksen kautta (kuva 1, vasen). Kevytbetoniseinän tapauksessa 1-2 mm:n korkea ilmarako oli jätetty yläsidepuun ja seinäharkon väliin (kuva 1, oikea). Testit tehtiin kolmella erilaisella

vuotoilmamäärän tapauksella. Ensimmäisessä testissä ilmavuoto oli mahdollinen koko liitoksen leveydessä. Sen jälkeen ilmasulun limitys ja rako yläsidepuun ja seinäharkon välissä teipattiin siten, että liitos jäi auki ainoastaan 10 cm matkalta. Kolmannessa testisarjassa, joka tehtiin mineraalivillatuulensuojalla, liitoksesta tuli teippauksesta ja ilmapitävämmästä tuulensuojasta johtuen ilmapitävämpi.



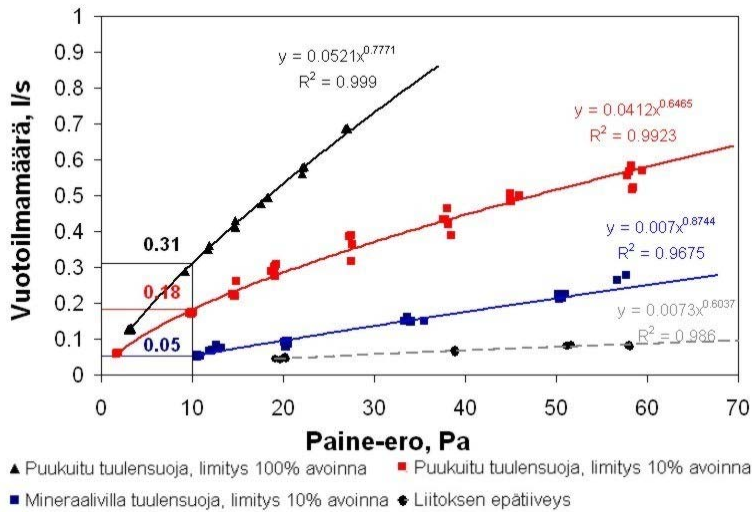
Kuva 1. Tutkittavan puurunkoisen seinän (vasen) ja kevytbetoniseinän (oikea) liitos puurunkoisen yläpohjan kanssa todellisuudessa (ylhäällä) ja laboratoriossa (alhaalla).



Kuva 2. Ilmansulun teippaamaton limitys katsottuna kylmäkammion puolelta (vasen) ja lämpimän kammion puolelta (oikea).

Vuotoilma rakenteen läpi mitattiin kuplavirtausmittarin avulla (Buck) eri paine-erojen tapauksessa, kuva 3. Mittauksien perusteella piirrettiin vuotokäyrät, minkä avulla myöhemmin oli

mahdollista määrittää paine-eromittauksien avulla vuotoilmamäärä. Vuotoilma mitattiin myös täysin teipatulla ilmansulun limityksellä. Vaikka tutkittava liitos yritettiin rakentaa laboratorioon mahdollisimman ilmatiiviisti, jäi sinne silti vähän myös hallitsemattomina ilmavuotoja.

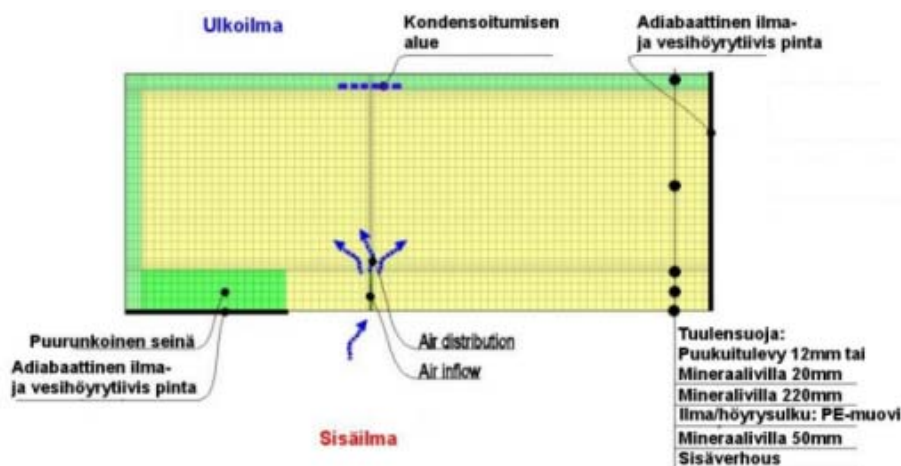


Kuva 3. Mitattu vuotoilmamäärä puurunkoisen seinän ja yläpohjan liitoksessa kolmessa eri testisarjassa ja rakenteen epätiivyyksien kautta tapahtunut ilmavuotomäärä (katkoviiva).

Laboratoriomittauksien aikana pysyvä ulkoilman lämpötila,  $T_{out}$ , oli eri testeissä  $0\text{ °C}$ :n ja  $-11\text{ °C}$ :n välillä, sisäilman lämpötila,  $T_{in}$ , ollessaan  $+22\text{ °C}$ . Sisäilman kosteuslisä,  $\Delta v$ , oli  $+4\text{ g/m}^3$ , mikä vastaa tyypillistä sisäilman kosteuskuormaa suomalaisissa pientaloisissa [11, 12]. Pysyvä paine-ero,  $\Delta P$ , lämpimän- ja kylmämämmion välillä oli eri testeissä  $+10\text{ Pa}$ :n ja  $+20\text{ Pa}$ :n välillä.

## 2.2 Laskennallinen tarkastelu

Laskennallisessa tarkastelussa käytettiin CHAMPS-BES (Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems) laskentaohjelmaa, mikä on kehitetty Syracusen yliopiston ja Dresdenin teknillisen yliopiston yhteistyössä [13]. Materiaalitietona käytettiin Tampereen teknillisen yliopiston talorakennustekniikan laboratoriossa mitattuja ominaisuuksia [14] ja tarvittaessa myös ohjelman omia materiaalitietoja. Ilmarako mallinettiin ei-hygroskooppisena huokoisena rakennusmateriaalina. Laskentaverkon tiheys oli  $\leq 10\text{ mm}$ :n suuruinen, mutta ilmavuotoreitin kohdassa käytettiin tiheämpää laskentaverkkoa (0,2 mm:iin asti) ja tilaelementtien kokonaismäärä oli noin 2500, kuva 4.



Kuva 4. Tutkittu ulkoseinän-yläpohjan liitos CHAMPS-BES ohjelmassa.



### 3. Tulokset

#### 3.1 Laboratoriomittaukset

Ulkoseinän-yläpohjan liitoksen laboratoriomittaukset suoritettiin kaksivaiheisena:

- koe alkoi 1-3 viikkoa kestäneellä tasoitusvaiheella, jolloin ilmavuotoa rakenteen läpi ei tapahtunut (ilmavuotoreitti oli täysin teipattu ja paine-ero rakenteen yli oli lähes nolla);
- sen jälkeen avattiin ilmavuotoreitit ja testi jatkui toivotulla paine-erolla.

Ensimmäiset seitsemän testiä tehtiin käyttäen tuulensuojalevynä 12 mm:n paksuista huokoista puukuitulevyä kahdella eri vuotoilmamäärällä (kuva 3 ja taulukko 1). Ensimmäisen kolmen testin jälkeen vuotoilmamäärää vähennettiin, koska -10 °C:n ulkolämpötilassa kosteus kondensoitui tuulensuojan taakse. Vähennetyllä vuotoilmamäärällä kosteutta kondensoitui edelleen tuulensuojan taakse ulkolämpötilan ollessaan -10 °C (testi 7).

*Taulukko 1. Testien olosuhteet ja havaittu kondenssi 12 mm:n paksuisen puukuitulevyn tuulensuojan sisäpinnassa.*

Testi	T <sub>out</sub> , °C	T <sub>in</sub> , °C	Δv, g/m <sup>3</sup>	ΔP, Pa	R, l/(s·m) @10Pa	Havaittu kondenssi tuulensuojan takana	
						Puurunkoinen seinä	Kevytbetoni seinä
1	0	+22	+4	+20	0,31	Ei	Vähäinen
2	-10	+22	+4	+20	0,31	Voimakas	Voimakas
3	-10	+22	+4	+10	0,31	Voimakas	Voimakas
4	0	+22	+4	+10	0,18	Ei	Ei
5	0	+22	+4	+20	0,18	Ei	Ei
6	-5	+22	+5	+10	0,18	Vähäinen	Vähäinen
7	-10	+22	+4	+10	0,18	Voimakas	Voimakas

Liitoksen kosteusteknistä toimivuutta yritettiin parantaa tuulensuojalevyllä, jonka vesihöyrynläpäisevyys ja lämmönvastus olisi suurempi. Neljä viimeistä testiä tehtiin asentamalla 12 mm:n paksuisen huokoisen puukuitulevyn tilalle 20 mm:n paksuinen Tyvek-pintainen mineraalivillatuulensuoja. Parannettu rakenne oli kosteusteknisesti toimivampi, koska tuulensuojan takana vesihöyryn kondenssia ei havaittu, taulukko 2. Toisaalta pitää huomioida, että paremmasta tiivistysmahdollisuudesta ja tuulensuojan pienemmästä ilmaläpäisevyydestä johtuen vuotoilmamäärä rakenteen läpi oli pienempi. Rakenteen kosteusteknistä toimivuutta isommilla vuotoilmamäärillä tarkasteltiin laskelmien avulla.

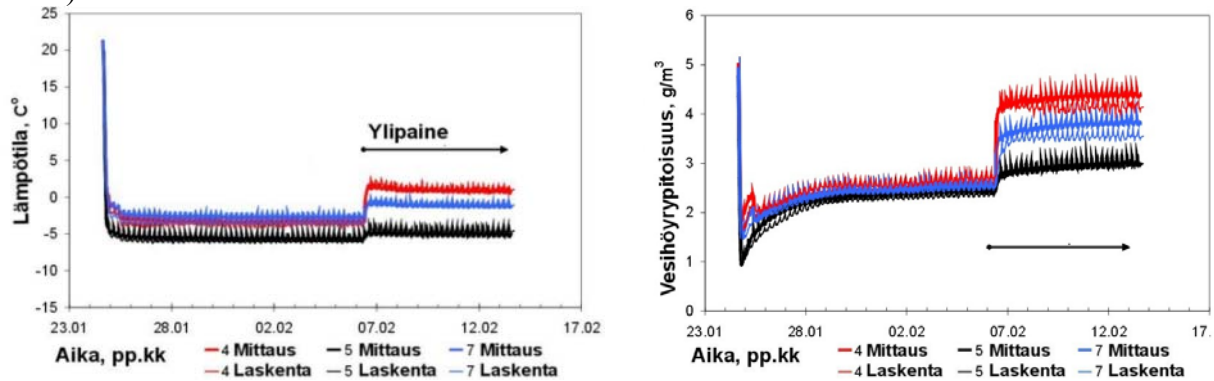
*Taulukko 2. Testien olosuhteet ja havaittu kondenssi 20 mm:n paksuisen Tyvek-pintaisen mineraalivillatuulensuojan sisäpinnassa.*

Testi	T <sub>out</sub> , °C	T <sub>in</sub> , °C	Δv, g/m <sup>3</sup>	ΔP, Pa	R, l/(s·m) @10Pa	Havaittu kondenssi tuulensuojan takana	
						Puurunkoinen seinä	Puurunkoinen seinä
8	-5	+22	+4	+10	0,05	Ei	Ei
9	-10	+22	+5	+10	0,05	Ei	Ei
10	-5	+22	+2.5	+10	0,05	Ei	Ei
11	-5	+22	+2.5	+20	0,05	Ei	Ei

## 3.2 Laskentatulokset

### 3.2.1 Mittaus- ja laskentatulosten vertailu

Mittaus- ja laskentatulosten vertailun tavoitteena oli selvittää laskentaohjelman toimintaa ja tarkastella, kuinka hyvin laskentatulokset vastaavat koetuloksia. Lämpötilan (vasen) ja vesihöyrypitoisuuden (oikea) mittaus- ja laskentatulosten vertailu yläpohjan liitoksessa yläpohjan tuulensuojan takana testissä 6 ovat esitetty kuvassa 5 (liitoksessa seinärakenteena puurunkoinen seinä).

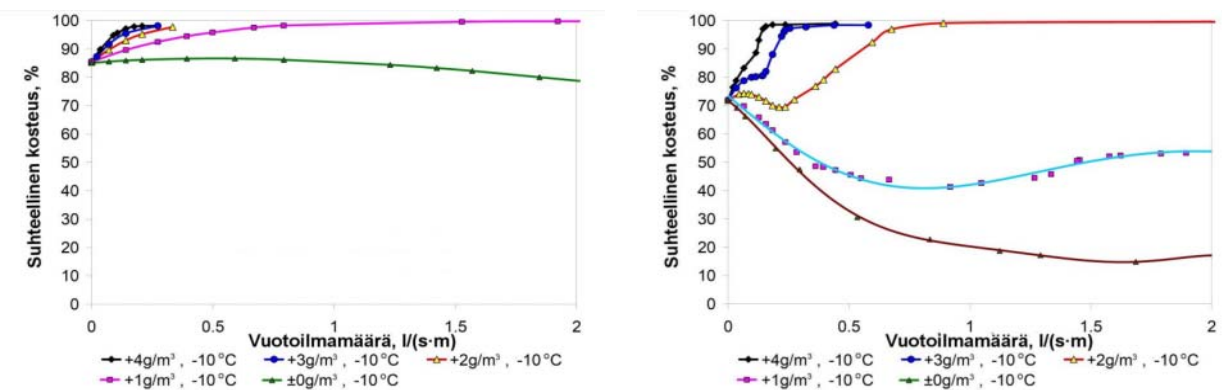


Kuva 5. Lämpötilan (vasen) ja vesihöyrypitoisuuden (oikea) mittaus- ja laskentatulosten vertailu puurunkoisen seinän ja yläpohjan liitoksessa yläpohjan tuulensuojan takana testissä 6.

### 3.2.2 Kosteustekninen toimivuus stationääritilassa

Sisäilman kosteuslisän, vuotoilmamäärän ja tuulensuojamateriaalin vaikutusta seinän ja yläpohjan liitoksen kosteustekniseen toimintaan tutkittiin ensin pysyvillä ilmasto-olosuhteilla. Kuvassa 6 on esitetty suhteellinen kosteus puukuitutuulensuojalevyn (vasen) ja mineraalivillatuulensuojalevyn (oikea) takana eri vuotoilmamäärillä ja kosteuskuormilla stationääritilassa kahden kuukauden kuluttua (2 viikkoa ilman ilmanvuotoa + 1,5 kuukautta ilmavuotolla) laskelmien alkuhetkestä, kun ulkolämpötila oli  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pieni lämmin vuotoilma voi laskea suhteellista kosteutta tuulensuojan takana lämpötilan noususta johtuen, jos tuulensuoja on vesihöyryä läpäisevä ja kosteuskuorma hyvin pieni. Kosteuskuorman ollessa korkeampi, esimerkiksi  $4\text{ g/m}^3$ , nostaa kostean ilman ulosvuoto nopeasti suhteellista kosteutta tuulensuojan takana ja johtaa kondenssiin. Tuulensuojamateriaalilla on selvä vaikutus puurunkoisen rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Ilman ulosvirtauksen suhteen Tyvek-pintainen mineraalivillatuulensuoja on sietokykyisempi puukuitutuulensuojalevyyn verrattuna.



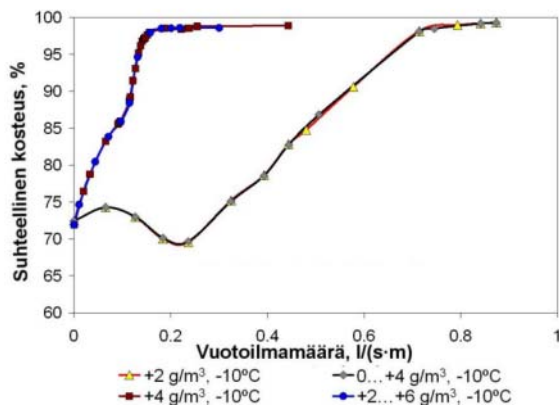
Kuva 6. Laskettu suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana (vasen puukuitulevy, oikea mineraalivillalevy) eri vuotoilmamäärillä ja eri kosteuskuormilla,  $t_{\text{ulko}} -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3 Vaihtelevan kosteuskuorman vaikutus

Vaihtelevan kosteuslisän vaikutusta seinä- ja kattoliitoksen kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin kahdessa tapauksessa:

- keskimääräinen kosteuslisä,  $\Delta v$ ,  $+2 \text{ g/m}^3$ , mikä vastaa keskimääräistä kosteuskuormaa puurunkoisissa pientaloissa: pysyvä  $\Delta v = +2 \text{ g/m}^3$  vastaan muuttuva  $\Delta v$ : 12 tuntia  $\Delta v = 0 \text{ g/m}^3$  ja 12 tuntia  $\Delta v = +4 \text{ g/m}^3$ ;
- keskimääräinen kosteuslisä,  $\Delta v$ ,  $+4 \text{ g/m}^3$ , mikä vastaa mitoitustason kosteuskuormaa puurunkoisissa pientaloissa: pysyvä  $\Delta v = +4 \text{ g/m}^3$  vastaan muuttuva  $\Delta v$ : 12 tuntia  $\Delta v = +2 \text{ g/m}^3$  ja 12 tuntia  $\Delta v = +6 \text{ g/m}^3$ ;

Laskentatulosten mukaan sama vuorokauden keskimääräinen kosteuslisä johtaa tuulensuojan takana samaan kosteuteen, eli tulokset eivät ole riippuvaisia kosteuskuormien vuorokausivaihtelusta. Siitä syystä kosteusteknisiä laskelmia voidaan tehdä pysyvällä kosteuslisällä. Toinen tulos, joka kuvasta 7 nähdään on se, että rakenne ei ehdi kuivua matalilla kosteuskuormilla vaihtelevissa kosteusrasituksissa vuorokausisyklin aikana.

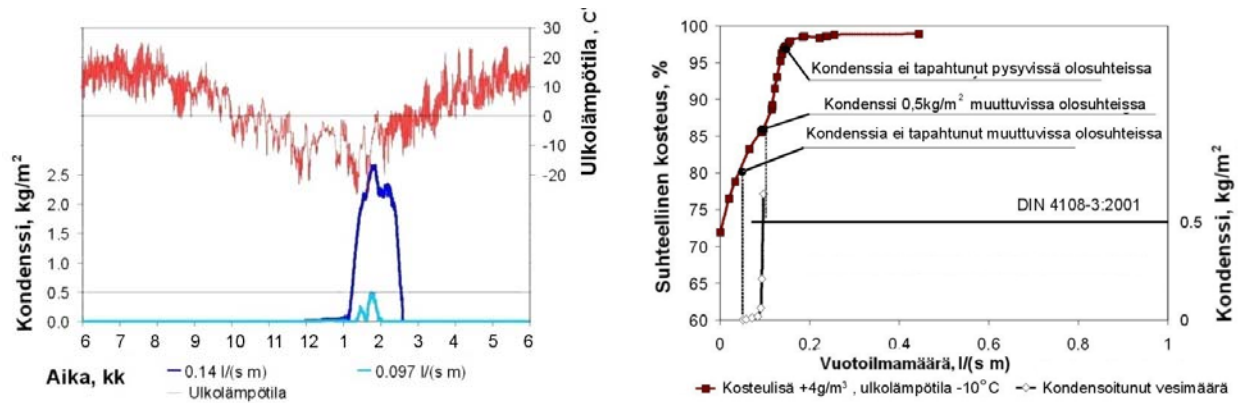


Kuva 7. Vaihtelevan kosteuskuorman vaikutus rakenteen kosteuskäyttäytymiselle.

### 3.2.4 Ulkoseinä- ja yläpohjaliitoksen kosteustekninen toiminta todellisissa ilmasto-oloissa.

Mineraalivillatuulensuojalla varustetun ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen laskennallisessa tarkastelussa ulkoilmastona käytettiin kosteusteknistä testivuotta [15], sisäilman kosteuslisän ja sisälämpötilan ulkolämpötilariippuvuutta ( $\Delta v_{t < 5^\circ\text{C}} = 4 \text{ g/m}^3$ ) [11]. Myös paine-ero rakenteen yli oli ulkolämpötilariippuvainen. Paine-ero laskettiin sisä- ja ulkolämpötilaeroista neutraaliakselilta 2,75 m:n korkeudella olevasta pisteestä (tuulen ja ilmanvaihdon vaikutusta ei otettu huomioon).

Ensimmäisessä laskelmassa ilmavuoto rakenteessa asetettiin sellaiseksi, että pysyvissä olosuhteissa kondenssia ei syntynyt. Sitä tapausta vastasi vuotoilmamäärä  $0,14 \text{ l/(s·m)}$  paine-eron ollessa  $+3,7 \text{ Pa}$  (sisä-/ulkolämpötilaero  $31 \text{ K}$ , korkeus neutraaliakselista  $2,75 \text{ m}$ ) ja ulkolämpötila ollessa  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tämä vuotoilmamäärä muuttui paine-eron muuttuessa. Tällainen ilman ulosvirtaus ( $0,14 \text{ l/(s·m)}$  paine-erolla  $+3,7 \text{ Pa}$ ), joka pysyvissä olosuhteissa ei synnyttänyt kondenssia, aiheutti muuttuvissa olosuhteissa kondenssia tuulensuojan taakse. Tällöin kondenssi oli maksimissaan  $2,6 \text{ kg/m}^2$  (kuva 8 vasen). Kondenssijakson pituus oli  $1,5$  kuukautta, mikä vastasi laskentajakson pituutta pysyvissä olosuhteissa. Myös keskimääräinen ulkolämpötila tällä ajanjaksolla oli lähes  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Eli molempien laskelmien keskimääräiset olosuhteet olivat samanlaiset. Kondensoituminen alkoi lämpötilan laskiessa alle  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  ja rakenne kuivui lämpötilan noustessa yli  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Kuva 8. Tuulensuojan sisäpinnalle kondensoitunut vesimäärä ilman ulosvirtauksien 0,14 l/(s·m) ja 0,097 l/(s·m) (paine-erolla +3,7 Pa) tapauksissa (vasen). Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty suhteellinen kosteus mineraalivillatuulensuojan takana ja kertynyt kondenssi muuttuvissa olosuhteissa.

Pienemmällä vuotoilmamäärällä (0,097 l/(s·m) paine-erolla +3,7 Pa) pysyvissä olosuhteissa ( $-10\text{ °C}$ ,  $4\text{ g/m}^3$ ) suhteellinen kosteus tuulensuojan takana oli 86 % RH. Muuttuvissa olosuhteissa sama vuotoilmamäärä aiheutti kondenssin tuulensuojan taakse. Kondenssin määrä oli maksimissaan  $0,5\text{ kg/m}^2$ . Maksimi kondenssin määrä  $0,5\text{ kg/m}^2$  on hyväksytty taso DIN 4108-3 [16] standardin mukaan. Jotta tuulensuojan takana kondenssin saisi täysin vältettyä muuttuvissa olosuhteissa, ilman ulosvirtaus pitää olla vielä pienempi: 0,05 l/(s·m) paine-erolla +3,7 Pa (kuva 8 oikea).

### 3.3 Pohdinta

Tutkimustulokset osoittavat rakenteiden ilmapitävyyden tärkeyttä. Ilman ulosvirtaus voi helposti synnyttää kondenssia tuulensuojan sisäpinnassa. Isompi kosteuskuorma, sisäinen ylipaine ja matalampi ulkolämpötila nostavat kondenssin määrää. Tulo-poistoilmavaihdon tapauksessa tavanomaiset tulo-poistoilmamäärien erot ovat pienet, jolloin paineolosuhteiden hallitseminen ilmanvaihdoilla on vaikeaa talon ilmapitävyyden ollessa keskimääräinen tai hatara ( $n_{50} > 4\text{ 1/h}$ ). Siksi ainoastaan hyvällä ilmapitävyydellä ja oikeilla materiaalivalinnoilla on mahdollisuus vaikuttaa rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen.

Vaikka stationääritilalaskelmat eivät osoittaneet ongelmia kosteusteknisen toimivuuden kanssa, todellisuudessa rakenteessa voi esiintyä paljon kondenssia, kuten tämän tutkimuksen dynaamiset laskelmat osoittivat. Tarkastetussa tapauksessa, jossa suhteellinen kosteus tuulensuojan takana oli 86 % RH:ta, kondensoitunut kosteusmäärä oli alle  $0,5\text{ kg/m}^2$ . Jotta kondenssin voisi välttää kokonaan, suhteellisen kosteuden pitäisi stationääritilalaskelmien mukaan olla 81 % RH, kun ulkolämpötila on  $-10\text{ °C}$ . Tällöin vuotoilmamäärät ovat 50 Pa:n tapauksessa 0,33 l/(s·m) ja 0,63 l/(s·m) tai 10 Pa:n tapauksessa 0,1 l/(s·m) ja 0,2 l/(s·m), jos vuotoyhtälössä eksponentti  $n=0,73$ . Nämä vuotoilmamäärät ovat riittävän pieniä, jos käytetyllä tuulensuojalevyllä on suuri vesihöyryläpäisevyys ja lämmönvastus. Huolellisella työsuorituksella vuotoilmamäärä 0,1 l/(s·m) paine-erolla +10 Pa on kohtuullisen helposti saavutettavissa [17-19].

Tämän tutkimuksen laboratoriomittaukset ja laskennalliset tarkastelut osoittivat, että tuulensuojan suurella vesihöyryläpäisevyydellä ja lämmönvastuksella on suuri vaikutus ulkovaipan kosteustekniseen toimivuuteen. Koska Tyvek-pintaisen mineraalivillatuulensuojalevyn liitoksia on parempi tiivistää teippauksen avulla, tuulensuojan avulla pystyy vaikuttamaan myös rakenteen ilmatiivyyteen.

#### 4. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ulkoseinän ja yläpohjan kosteusteknistä toimivuutta kosteuskonvention kannalta laboratoriokokeilla täydessä mittakaavassa ja kaksiulotteisella laskennalla CHAMPS-BES ohjelmalla.

Laboratoriomittaukset ja laskennallinen tarkastelu osoittivat ulkovaipan kosteusteknisen toimivuuden herkkyyttä kosteuskonvektion kannalta: vuotoilmamäärä, kosteuskuorma ja ulkolämpötila vaikuttavat olennaisesti kondensoituneen kosteuden määrään. Rakennuksissa, joissa tulo-poistoilmanvaihdon avulla ei pystytä paineolosuhteita hallitsemaan, on rakenteen kosteusteknisen toimivuuden takaamiseksi olennaista rakenteen hyvä ilmapitävyys ja materiaalien oikea valinta.

Tuulensuojan suuri vesihöyryläpäisevyys, ilmapitävyys ja lämmönvastus parantavat ulkovaipan kosteusteknistä toimivuutta kosteuskonvektion kannalta. Kaksikerroksisen pientalon puurakenteisen ulkovaipan ilmapitävyyden kriteerinä voidaan pitää kosteuskonvektion kannalta 10 Pa:n mitoituspaine-erolla 0,1 l/(sm) (kondenssia ei sallita) tai 0,2 l/(sm) (kondenssi <0,5 kg/m<sup>2</sup>), jos tuulensuojalla on hyvä vesihöyryläpäisevyys ja lämmönvastus. Huolellisella työsuorituksella nämä vuotoilmamäärät ovat kohtuullisen helposti saavutettavissa.

Sisäisten kosteuskuormien vuorokausivaihtelu ei vaikuta ulkovaipan ulkokerroksien kosteuspitaisuuteen: pysyvällä kosteuslisällä laskentatulokset eivät eroa vaihtelevalla kosteuslisällä lasketuista tuloksista. Samalla keskimääräisten ulko-olosuhteiden (stationääritilalaskenta) käytöllä toimivuuskriteerin pitää olla paljon tiukempi, kuin dynaamisella laskennalla käytettävän kriteerin. Vuotoilmamäärä, joka keskimääräisillä ulko-olosuhteilla ei synnyttänyt kondenssia, aiheutti kondenssin (2,6 kg/m<sup>2</sup>), kun laskenta tehtiin dynaamisella tuntitarkastelulla. Näin ollen vakiokosteuslisän käyttö ei johda epätarkkuuksiin, mutta kosteusteknisessä tarkastelussa on suositeltavaa käyttää dynaamista laskentaa ja tunnin välein olevia säätietoja.

#### 5. Kiitokset

Tutkimuksen on rahoittanut Suomen Akatemia (grant 210683) ”Interaction of building envelope and ventilation system in controlling of contaminants and moisture convection in building envelope”.

#### Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climate Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly, Doctoral thesis, Tampere University of Technology.
- [2] Kalamees, T., Kurnitski, J., Jokisalo, J., Eskola, L., Jokiranta, K., Vinha, J. 2007. Air pressure conditions in Finnish residences. Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors 10–14.06.2007 Helsinki, Finland.
- [3] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Salminen, K., Aho, H. ja Salminen, M. 2009. Asuinrakennusten ilmapitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tutkimusraportti 140. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

- [4] Ojanen, T. and Kumaran, K. 1996. Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behaviour of a Residential Wall Assembly. *Journal of Thermal Insulation and Building Environments*; 19(3):215-227.
- [5] Hagentoft, C.-E., Harderup, E. 1996. Moisture Conditions in a North Facing Wall with Cellulose Loose Fill Insulation: Constructions with and without Vapor Retarder and Air Leakage. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*; 19(3):228-243.
- [6] Janssens, A., Hens, H. 2003. Interstitial condensation due to air leakage: a sensitivity analysis. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*; 27(1):15-29.
- [7] Rantamäki, J., Kääriäinen, H., Tulla, K., Viitanen, H., Kalliokoski, P., Kesikuru, T., Kokotti H., Pasanen, A-L. 2000. Rakennusten ja rakennusmateriaalien homeet. VTT Tiedotteita: 2030. VTT Rakennustekniikka, Espoo. 40 s. + liit. 6 s.
- [8] Airaksinen, M., Pasanen, P., Kurnitski, J., Seppänen, O. 2004. Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space: a field study. *Indoor Air*; 14(1):55-64.
- [9] Mattson, J., Carlson, O.E. and Engh, I.B. 2002. Negative influence on IAQ by air movement from mould contaminated constructions into buildings, *Indoor Air 2002*, Vol. 1, Monterey, CA, USA, 764- 769.
- [10] Kalamees, T.; Korpi, M.; Eskola, L.; Kurnitski, J.; Vinha, J. 2007. Kylmäsiltojen ja ilmapuotokehtien jakauma suomalaisissa pientaloissa ja kerrostaloasunnoissa. *Rakennusfysiikka 2007: Tampere, Finland, 18-19.10.2007*, 295 - 302.
- [11] Kalamees, T., Vinha, J., Kurnitski, J. 2006. Indoor Humidity Loads and Moisture Production in Lightweight Timber-frame Detached Houses. *Journal of Building Physics*, 29(3), 219 - 246.
- [12] Kumaran, K.; Sanders, C. 2008. Final report of the IEA Annex 41 Whole Building Heat Air and Moisture response - Subtask 3: Boundary Conditions and Whole Building HAM Analysis. IEA Exco ECBCS.
- [13] Grunewald, J., Nicolai, A. 2006. CHAMPS-BES Program for Coupled Heat, Air Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems, version 1, 2006. User manual.
- [14] Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysiikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio.
- [15] Kalamees, Targo; Vinha, Juha (2004). Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations. *Journal for Thermal Envelope & Building Science*, 27(3), 199 - 220.
- [16] DIN 4108 Teil 3. "Wärmeschutz im Hochbau; Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung". Deutsches Institut für Normung, 2001.
- [17] Sandberg, P.-I., Sikander, E. 2004. Lufttäthetsfrågorna i byggprocessen – Kunskapsinventering, laboratoriemätningar och simuleringar för att kartlägga behov av tekniska lösningar och utbildning. . SP Energiteknik, SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Rapport 2004:22. Borås.
- [18] Sandberg, P.-I., Sikander, E. 2007. Lufttäthetsfrågorna i byggprocessen - Etapp B. Tekniska konsekvenser och lönsamhetskalkyler. SP Energiteknik, SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2007:23. Borås.
- [19] Basset, M. 1987. Air flow resistance in timber frame walls. *Air Infiltration and Ventilation Centre, Moisture workshop, 23.03.1987*. Building Research Association of New Zealand.

# Ohjeita ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutukseen

Hanna Aho ja Juha Vinha  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Ilmanpitävyys on koko rakennuksen ominaisuus. Nykyisillä lämmöneristepaksuuksilla vuotoilmanvaihdon vähentäminen on merkittävimpiä ja ennen kaikkea edullisimpia keinoja jo sinällään energiataloudeltaan hyvien rakennusten parantamisessa. Hyvä ilmanpitävyys tehostaa rakennuksen ilmanvaihtolaitteiston toimintaa sekä parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Rakenteiden ja erityisesti niiden välisten liitosten ilmanpitävyyden suunnitteluun tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota, kun rakentamisessa siirrytään kohti matalaenergiataloja.

*AISE – Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous* -tutkimushankkeen yhteydessä julkaistiin ohjekirja *Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa* (TTY, Tutkimusraportti 141). Ohjeet koottiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennetekniikan tutkimusyksion tutkijoiden toimesta ja niitä kommentoivat tutkimushankkeen johtoryhmässä jäsenenä olleet rakennusalan asiantuntijat. Suomalaiseen rakentamiseen soveltuvia yleisiä ohjeita suunnittelutyön tueksi ei ole juuri aiemmin ollut. Julkaisussa esitetyt ohjeet on tehty mahdollisimman yleispäteviksi ja suunnittelutoimistot voivat kehittää detaljeja kohdekohtaisesti edelleen. Tässä työssä on esitetty ohjeiden kehitystyön vaiheita sekä ohjeiden sisältö tiivistettynä ja esimerkkejä ohjeessa käsitellyistä rakennedetaljeista.

## 1. Johdanto

Rakennusten lämmitysenergiankulutusta voidaan pienentää lisäämällä vaipparakenteiden lämmöneristepaksuutta ja parantamalla vaipan ilmanpitävyyttä. Lämmöneristepaksuuksien lisääminen ei yksinään riitä, koska lämpö karkaa rakennuksesta paine-erojen aiheuttamien ilmavirtausten eli konvektion mukana ulos ja vastaavasti kylmä ilma virtaa sisälle, ellei rakennuksen ulkovaippa ole ilmanpitävä. Ilmanpitävyys vaikuttaa myös rakenteiden kosteustekniseen toimintaan sekä edelleen niiden pitkäaikaiskestävyyteen. Samoin ilmanvaihtojärjestelmän suunnitelman mukainen toiminta edellyttää rakenteilta riittävää ilmanpitävyyttä.

Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyydestä on tehty useita tutkimuksia. Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) rakennustekniikan laitoksen ja Teknillisen korkeakoulun (TKK) LVI-tekniikan laboratorion tutkimushankkeissa *Kosteusvarma terve pientalo 2002–2004* ja *AISE – Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous 2005–2008* tehtiin laajoja mittauksia uudehkoissa pien- ja kerrostaloissa muun muassa rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyyden osalta. Suurin osa uudisrakennuksista ei kuitenkaan saavuttanut ilmanpitävyydelle asetettua ohjearvoa  $n_{50} = 1,0$  1/h. [2, 3]

Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen julkaisusarjassa ilmestyi vuoden 2009 alussa ilmanpitävien rakenneratkaisujen suunnitteluun ja toteutukseen opastava raportti

*Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa* [1]. Raportti on osa AISE - tutkimushanketta. Julkaisun ohjeet on laadittu TTY:n rakennetekniikan tutkijoiden työryhmässä mahdollisimman yleispäteviksi ja niiden jatkokehitys suunnittelijoiden toimesta on toivottavaa.

## **2. Ohjeiden kehitystyö**

Kehitystyön alkuvaiheessa TTY:n tutkijaryhmässä pohdittiin ulkomaisten ohjeiden ratkaisujen toimivuutta suomalaisessa rakentamisessa. Lähteistä poimittiin toimivaksi arvioituja ratkaisuja ohjeen pohjaksi, mutta detaljit päädyttiin tekemään lopulta lähes kokonaan uudestaan. Kehitystyön aikana ratkaisuja esiteltiin AISE -tutkimushankkeen johtoryhmässä ja johtoryhmän kommentteja huomioitiin detaljien kehityksessä.

Julkaissuissa esitetään ilmanpitävyydeltään hyviä ja toteutettavissa olevia esimerkkiratkaisuja asuinrakennuksille. Keskeisistä, ilmanpitävyyden kannalta ongelmallisista liitoksista on tehty detaljipiiirroksia, joissa esitetään yksi vaihtoehto ilmanpitävän ratkaisun saavuttamiseksi. Kaikkia rakenne- ja liitosvariaatioita ei ole esitetty, vaan on pyritty esittämään tapauskohtaisesti sovellettavia periaatteita ja rakennesuunnittelijoiden toivotaan kehittävän ratkaisuja edelleen. Rakenteiden ja liitosten suunnittelussa on otettu huomioon lämmön- ja kosteudeneristysmääräykset ja -ohjeet sekä rakenteille asetettavat muut vaatimukset kuten rakenteiden kantavuus ja rakennuksen paloturvallisuus.

Detaljikuvien yhteydessä rakenteille annetaan toteutusohjeet sekä ratkaisujen soveltamiskohteita. Tekstissä pyritään selventämään kussakin detaljissa ilmanpitävyyden kannalta olennaisia asioita. Esimerkkikuvat ovat pääosin pientalojen rakenteita, mutta ratkaisuja voidaan soveltuvin osin toteuttaa myös rivi- ja kerrostaloissa.

Viime vuosina markkinoille on tullut useita erityyppisten liitosten tiivistämiseen tarkoitettuja erikoistuotteita. Julkaissuissa ei kuitenkaan käsitellä tiivistämiseen tarkoitettuja erikoistuotteita, vaan päätettiin keskittyä hyvien ratkaisujen toteutukseen yleisesti käytettävissä olevilla materiaaleilla.

## **3. Yleiset ohjeet ilmanpitävyyden varmistamiseksi**

Rakenteen ilmatiiviyys toteutetaan yleensä erillisellä ilmansulkukerroksella. Muuratuissa harkkorakenteissa ilmansulkukerros on yleensä tasoitekerros ja puurankarakenteissa erillinen kalvomainen tai levymäinen ilman- ja höyrynsulkukerros. Massiivisissa rakenteissa ei välttämättä tarvita erillistä ilmansulkukerrosta, mikäli rakenteen ilmatiiviyys itsessään on riittävä. Tällöinkin on kiinnitettävä huomiota rakenteen liitoskohtiin. Puurankarakenteissa ilmansulku ja höyrynsulku toteutetaan yleensä yhdellä yhteisellä kerroksella, jolloin sulun tulee olla lähellä rakenteen lämmintä sisäpintaa.

Ilmanpitävän kerroksen tulee jatkua yhtenäisenä koko rakennuksen vaipan ympäri, joten eri rakenneosien ilmansulkujen tulee liittyä tiiviisti toisiinsa. Heikosti toteutetut ilmanpitävän kerroksen liitoskohdat aiheuttavat erilaisia ongelmia riippuen ilmavuotokohdan sijainnista rakennuksessa. Kosteusteknisen toiminnan kannalta ongelmallisia ovat yläpohjan putki- ja hormiläpiviennit sekä yläpohjan ja ulkoseinän liitos. Rakennuksen yläosassa olevasta ylipaineesta johtuen rakenteeseen voi näistä vuotokohdista siirtyä ja tiivistyä huomattavia määriä kosteutta. Alapohjan ja ulkoseinän välinen ilmavuoto koetaan taas enemmän asumisviihtyvyyttä heikentävänä vetona. Alapohjan liitoksesta sisäilmaan voi myös kulkeutua sisäilmaan paljon



epäpuhtauksia. Merkittäviä lämpövuoto- ja samalla ilmavuotoaikoita mittauksissa olivat ikkunoiden liitokset seinään sekä varsinainen ikkunarakenne [3]. Ikkuna- ja oviliitoksista on julkaisussa esitetty omat tiivistysohjeensa. Ikkunarakenteen ilmanpitävyyden parantaminen kuuluu ikkunavalmistajien tuotekehityksen piiriin.

Ilmanpitävyyden varmistamiseksi rakennuksen ilmanpitävän kerroksen jatkuminen rakennusosasta toiseen tulee suunnitella kokonaisuutena. Etenkin sekkarakenteiden yhteensovittaminen on usein ongelma rakennuksen ilmanpitävyydelle, koska ratkaisuja ei ole ohjeistettu riittävästi. Hyvin suunnitellut detaljitkaan eivät yksinään riitä rakennuksen ilmanpitävyyden varmistamiseen. Työn tekijällä ja työnjohdolla täytyy olla tieto siitä, miksi halutaan tehdä ilmanpitävä rakennus, ja motivaatiota tehdä se. Tällöin työ suoritetaan riittävän huolellisesti.

Käytettyjen ratkaisujen tulee säilyä ilmanpitävinä koko rakennuksen käyttöajan. Ilmansulkuna käytettyjen materiaalien tulee olla kestäviä ja ilmansulkuun rakennusaikana syntyvät reiät tulee paikata asianmukaisesti. Erityisesti rakenneosien välisissä liitoksissa ja muissa piiloon jäävissä ratkaisuissa tulee pyrkiä varmistamaan pitkäaikaiskestävyys, koska myöhemmin ratkaisujen parantaminen edellyttää rakenteiden avaamista tai jopa uusimista. Rakennus tulee pääsääntöisesti suunnitella niin, ettei merkittäviä muodonmuutoksia pääse syntymään. Rakenteiden ja niiden liittymien tulee kuitenkin kestää pieniä muodonmuutoksia ilman merkittäviä halkeamia tai muita haitallisia muutoksia.

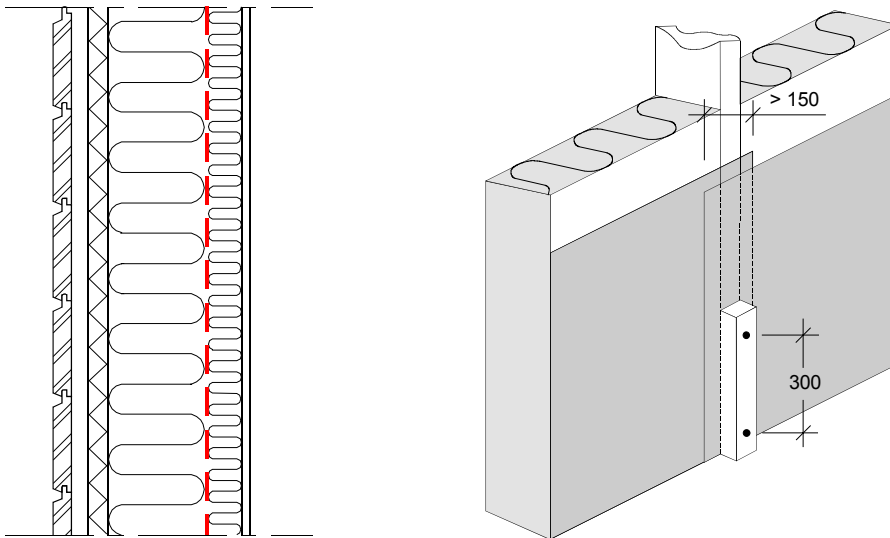
## 4. Rakenteet

Yleisten ilmanpitävyysohjeiden jälkeen julkaisussa käsiteltiin erikseen ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden ilmanpitävyyttä. Rakenteista käsiteltiin sekä puuranka-, kivi- että hirsirakenteita. Osa rakennevaihtoehdoista käsiteltiin vain sanallisesti.

### 4.1 Seinät

Seinärakenteiden osalta julkaisussa keskityttiin lähinnä rankarakenteisiin seiniin, koska niissä ilmansulku toteutetaan pääosin erillisellä, rakenteen sisään sijoitetulla, rakennekerroksella. Muuratuilla, ilmaa läpäisevillä, harkkorakenteilla ilmanpitävyys perustuu pintakäsittelyiden yhtenäisyyteen ja muiden rakenneosien liitoksiin. Pintakäsittelyjen tulee ulottua myös kiintokalusteiden ja alaslaskettujen kattojen taakse. Betonielementtiseinillä elementtien väliset liitokset ja liittyminen muihin rakenneosiin ovat suurimmat riskikohdat. Hirsiseinissä ilmanpitävyyteen vaikuttavat eniten suoralla osalla hirren profiili ja nurkissa salvosratkaisut.

Rankarakenteisissa seinissä ilmansulkukalvo voidaan sijoittaa joko suoraan sisäpinnan levyn taakse tai noin 50 mm etäisyydelle siitä lämmöneristeen sisään. Jälkimmäisessä versiossa ilmansulkukerros on paremmin suojassa, eivätkä esimerkiksi seinään lyödyt naulat tee siihen reikiä. Myös upotetut sähköasiat ja levyn takana kuljetettavat sähköputkitukset voidaan tällöin tehdä rikkomatta ilmansulkukerrosta. Ilmansulkuna voi toimia joko kalvo tai muovieristyslevy. Höyrynsulkuna toimivan kerroksen upottaminen lämmöneristeen sisään soveltuu paremmin paikalla rakennettaviin kohteisiin kuin elementtirakentamiseen, koska sisäpuolinen eriste tulee asentaa vasta, kun suurta kosteusrasitusta aiheuttavat sisätyövaiheet on tehty ja suurin osa rakennusaikaisesta ylimääräisestä kosteudesta on kuivunut. Kun ilman/-höyrynsulkukalvo viedään lämmöneristeen sisään, tulee ainakin  $\frac{3}{4}$ :n lämmöneristeen paksuudesta sijaita kalvon ulkopuolella [4]. Kalvomaisen ilmansulun sijoitus lämmöneristeen sisään on esitetty kuvassa 1.

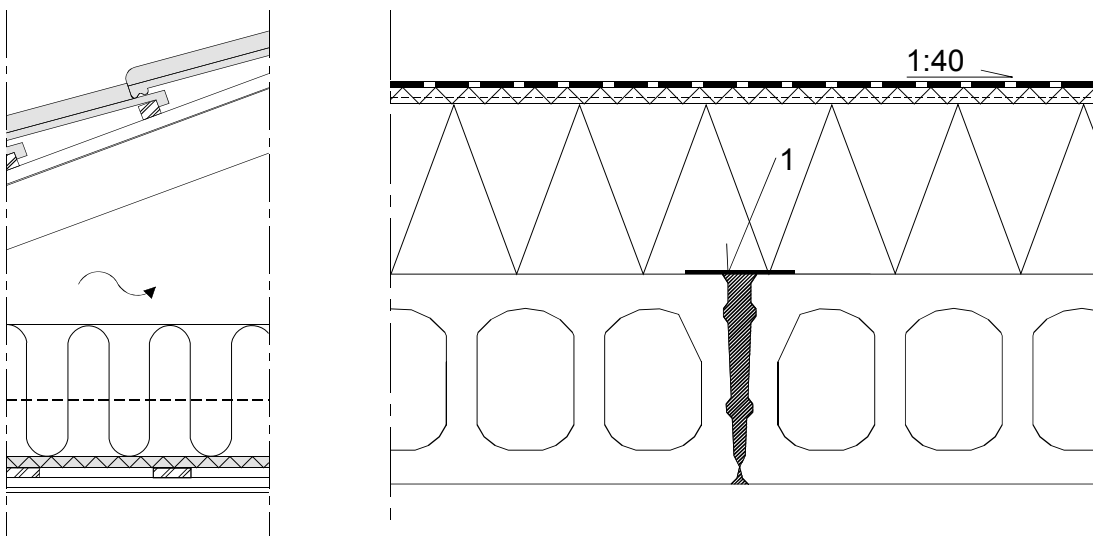


Kuva 1. Puurankaseinän ilman-/höyrynsulun sijoittaminen seinärakenteeseen sekä ilmansulkukalvon jatkos runkotolpan kohdalla.

Mikäli ilmansulkukerros tehdään kalvomaisella tuotteella suoraan sisälevyn taakse, tulee varmistaa, etteivät sähköasennukset riko kalvoa. Tämä koskee putkitusten lisäksi erityisesti sähkörasioita.

## 4.2 Yläpohjat

Yläpohjien ohjeistuksessa käsiteltiin puu- ja kivirakenteisia yläpohjia. Molemmista on esitetty yksi esimerkki kuvassa 2. Puurakenteissa ilmanpitävä kerros voidaan toteuttaa ilmansulkukalvolla, samoin kuin seinissä, tai jäykällä muovieristyslevyllä, jolloin yläpuoliset lämmöneristekerrokset eivät riko painollaan ilmansulkukerrosta. Tarvittaessa ilmansulkukalvon tueksi voidaan asentaa rakennuslevy kalvon alapuolelle. Ilmansulkukalvon jatkokset yläpohjissa limitetään ja teipataan yhteen riittävän tartuntakyvyn ja pitkäaikaiskestävyyden omaavalla teipillä. Varmempi ratkaisu on vielä puristaa teipattu jatkos tiiviiksi puurimoilla.



Kuva 2. Puurakenteisen yläpohjan sekä ontelolaattayläpohjan ilmanpitävyys. Puurakenteissa ilmanpitävä muovieristyslevy ilmansulkuna tukee yläpuolisia lämmöneristeitä. Betonielementtiyläpohjan saumat tulee tiivistää saumavalun lisäksi esimerkiksi bitumikermikaistalla.

Kivirakenteiset yläpohjat ovat yleensä betoni- tai kevytbetonielementtejä. Näiden rakenteiden ilmanpitävyyden ja kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi elementtien väliset saumat tulee tiivistää erikseen yläpuolelta esimerkiksi kapealla bitumikermikaistalla. Saamavaluihin tulee käytännössä aina halkeamia, joista ilmaa ja sen mukana kosteutta pääsee kertymään lämmöneristekerrokseen.

### 4.3 Alapohjat

Ilmanpitävät rakenteet edesauttavat hyvän sisäilman saavuttamista. Tämä koskee erityisesti alapohjarakenteita, joissa rakenteen läpi virtaava ilma tuo yleensä mukanaan paljon epäpuhtauksia. Haitallisimpia alapohjien ilmapuotokohdista sisäilmaan virtaavista yhdisteistä ovat radon-kaasu ja mikrobit. Julkaisussa käsitellään ratkaisuja sekä maanvastaisten että ryömintätilaisten alapohjien ilmanpitävyyteen.

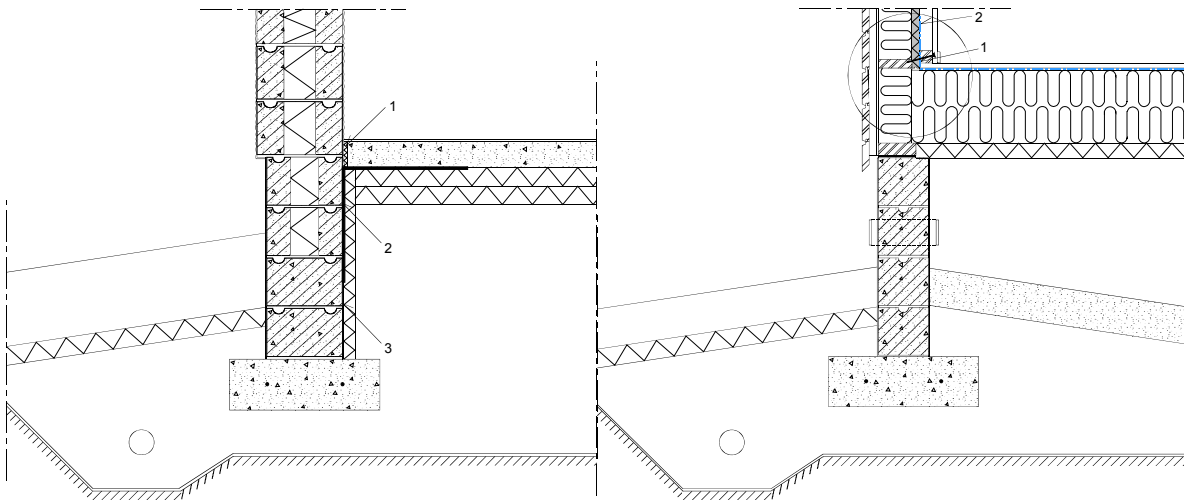
Paikallavalettujen alapohjien ilmatiiviys varmistetaan toteuttamalla alapohjan ja ulkoseinän välinen liitos huolellisesti sekä tiivistämällä alapohjan läpiviennit. Suuret tyhjää tilaa sisältävät läpivientivaraukset on suositeltavaa tiivistää myös putken sisäpuolelta. Tuulettuvissa kivirakenteisissa alapohjissa elementtien väliset saumat tulee tiivistää kuten betonielementtiyläpohjien saumat, ellei laatastoa päälle tehdä pintavalua. Puurakenteisessa tuulettuvassa alapohjassa on suositeltavaa olla erillinen ilmansulkukerros lattian levyrakenteen alla. Mikäli ilmanpitävä kerros toteutetaan pelkästään lattialevyllä, tulee levynä käyttää ympärirapattua, paksua kansivaneria. Ulkoseinälinjoilla ilmanpitävä kerros liitetään seinän ilmansulkuun esimerkiksi höyrynsulkumuovikaistalla. Tuulettuvilla alapohjilla rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on olennaista ryömintätilan tehokas tuuletus ja maanpinnan eristäminen esimerkiksi kevytsorakerroksella.

## 5. Liitosdetaljit

Liitosdetaljeista pyrittiin kuviin valitsemaan ilmanpitävyyden kannalta kriittisiä liitoksia. Näistä on tehty detaljipiirroksia, joissa esitetään yksi vaihtoehto ilmanpitävän ratkaisun saavuttamiseksi. Kaikkia rakenne- ja liitosvariaatioita ei ole esitetty, vaan pääasiassa esitettiin tapauskohtaisesti sovellettavia periaatteita.

### 5.1 Alapohja-ulkoseinä

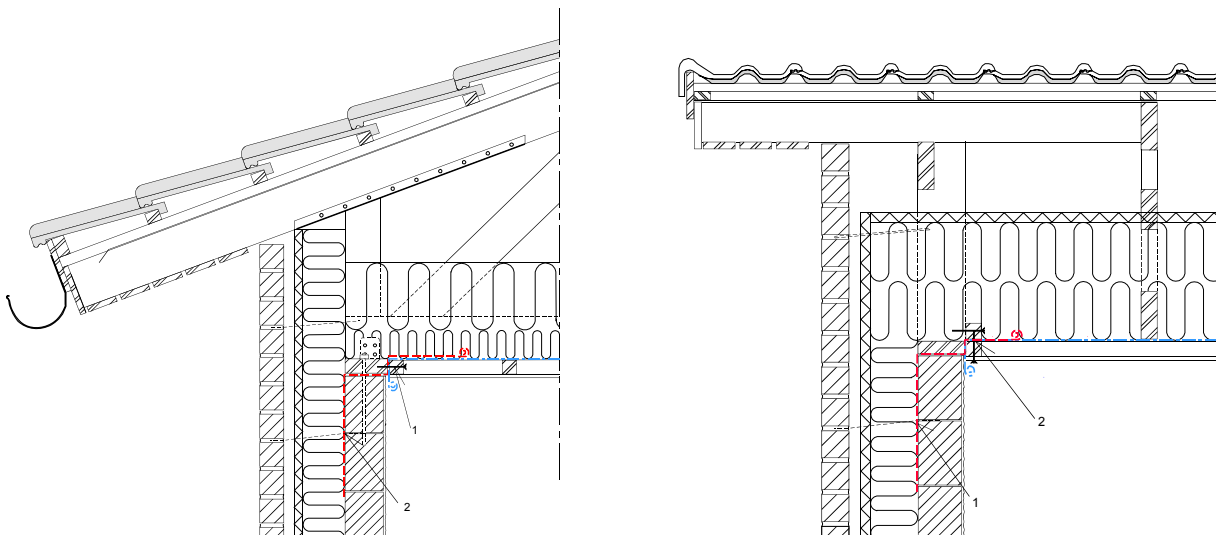
Alapohja-ulkoseinäliitoksen ilmanpitävyys vaikuttaa sisäilman laatuun estämällä maaperän epäpuhtauksien ja radonin pääsyn huoneilmaan. Maanvaraisten alapohjien ohjeissa tiivistys toteutettiin yleensä bitumikermikaistalla. Kuvassa 3 on esitetty esimerkit maanvaraisen ja ryömintätilaisen alapohjan tiivistysratkaisuista.



Kuva 3. Maanvastaisen betonilaatan ja ulkoseinän välinen liitos sekä puurakenteisen tuulettuvan alapohjarakenteen liittyminen ulkoseinään. Puurakenteisesta liitoksesta on julkaisussa ympäröidyltä osalta esitetty eri vaihtoehtoja.

## 5.2 Yläpohja-ulkoseinä

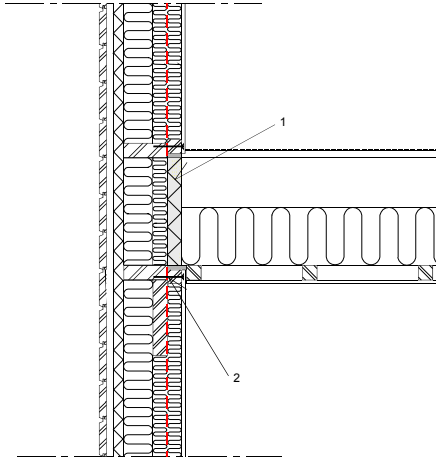
Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksesta voi pienistäkin epätiiviykskohdista siirtyä rakenteeseen huomattavia määriä kosteutta, koska rakennuksen yläosa on yleensä ylipaineinen ja sisäilman kosteuspitoisuus suurempi kuin yläpohjan tuulettutilassa olevan ilman. Liitoksessa usein myös yhdistyvät puurakenteinen yläpohjarakenne ja kivirakenteinen seinä (kuva 4). Tällöin ilmanpitävän kerroksen materiaali muuttuu liitoksessa ja ilmanpitävän kerroksen jatkuvuus rakenneosasta toiseen on tarkistettava. Puurankaseinillä tulee varmistaa ilmanpitävien kerrosten riittävä limittyminen ja tiivistystavat etenkin rakennuksen nurkissa. Hirsirakennuksilla liitoksen ja tiivistyksen tulee kestää rungon mahdollinen painuma repeytymättä.



Kuva 4. Puuyläpohjan ja kivirakenteisen ulkoseinän liitosdetaljit. Vasemmalla sivuräystäs ja oikealla päätyräystäs.

### 5.3 Välipohja-ulkoseinä

Välipohjan ja ulkoseinän välinen liitos aiheuttaa ilmanpitävyyden kannalta ongelmia pääasiassa puurankarakenteilla sekä sekarakenteilla. Puurankataloissa ilmansulku suositellaan tehtäväksi ilmanpitävän muovieristyslevyn avulla ainakin välipohjan kohdalla (kuva 5).

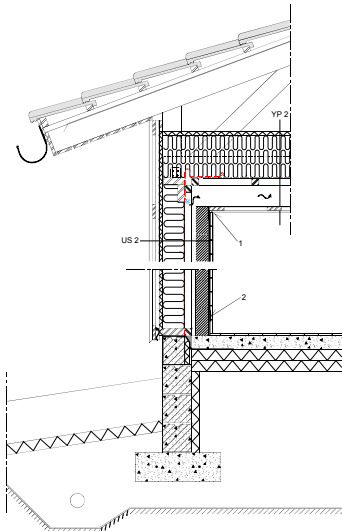


Kuva 5. Puurankatalon välipohjaliitos, kun seinän ilmansulkuna on kalvo. Välipohjarakenteen kohdalla ilmansulku on toteutettu ilmatiiviin muovieristyslevyn avulla ja molempien kerrosten ilmansulkukalvot on tiivistetty välipohjaan.

Erityisenä yksityiskohtana voidaan mainita ontelolaattavälipohjan liittäminen puurakenteiseen ulkoseinäelementtiin. Ilmanpitävyyden ongelmana ei tässä tapauksessa yleensä ole varsinainen välipohjan ja ulkoseinän liitos, vaan ulkoseinän elementtien välinen liitos. Jos ontelolaatta on kiinnitetty seinäelementtiin, laatan virumasta johtuva liike voi avata liitoksen ja rikkoa ilmanpitävän kerroksen yhtenäisyyden.

## 6. Märkätilat

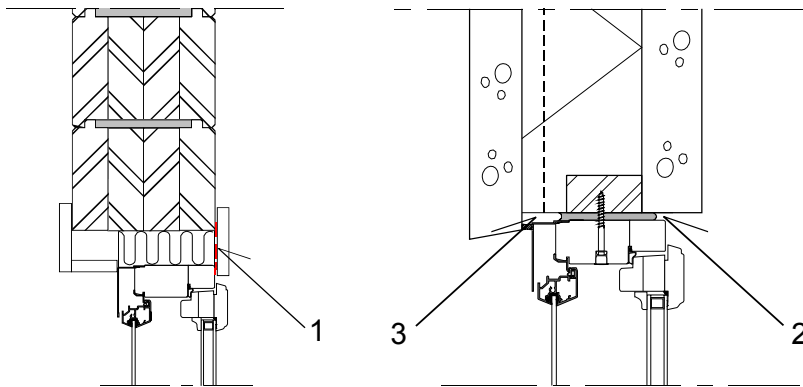
Märkätilojen ja saunojen ilmanpitävyyttä käsiteltiin julkaisussa lyhyesti. Märkätilojen ilmanpitävyyden ongelma on yleensä tiiviiden pintojen (märkätilan vedeneriste ja seinän tai yläpohjan höyrinsulku) väliin jäävän tilan tuuletusjärjestelyt ja mahdollisten kosteusvaurioiden kuivuminen. Ongelma on siis pääasiassa kosteusteknisessä toimivuudessa eikä ilmanpitävyydessä. Märkätilojen kohdalla suositellaan käytettäväksi mahdollisuuksien mukaan hyvin kosteutta kestäviä rakenteita, esimerkiksi tekemällä märkätilan kohdalla seinän sisäkuori kivrakenteisena (kuva 6). Ulkoseinän höyrinsulun ja märkätilan sisäkuoren väliin jätetään yläosasta kuivaan sisäilmaan avoin tuuletusväli. Puurankaseinän höyrinsulkua ei tule poistaa märkätilan kohdalta, koska sen poistaminen johtaa ilmanpitävyysongelmiin. Jos seinärakenteen ilmanpitävät kerrokset sijaitsevat eri tasoissa rakenteessa, kerrosten liittäminen tiiviisti toisiinsa on käytännössä mahdotonta toteuttaa.



Kuva 6. Märkätilan kohdalla suositellaan seinän sisäkuori toteutettavaksi kivirakenteisena myös puurankaisissa taloissa. Lisäksi tulee huolehtia märkätilan vedeneristyksen ja seinän höyrynsulun väliin jäävän ilmaraon tuulettumisesta lämpimään sisäilmaan.

## 7. Ikkunat ja ovet

Ikkunan liitosten osalta julkaisussa todetaan, että tällä hetkellä käytössä olevat ratkaisut ovat periaatteiltaan riittävän tiiviitä, kun ikkunan asennus paikalleen ja tiivistäminen suoritetaan huolellisesti. Karmien tiivisteiden kunto ja toiminta tulee tarkastaa asentamisen yhteydessä. Ongelmallisia ovat yleensä painumavaraa vaativat rakenteet, kuten liitettäessä ikkuna massiivihirsiseinään. Ikkunan liitosesimerkit hirsi- ja betonielementtiseinään on esitetty kuvassa 7.



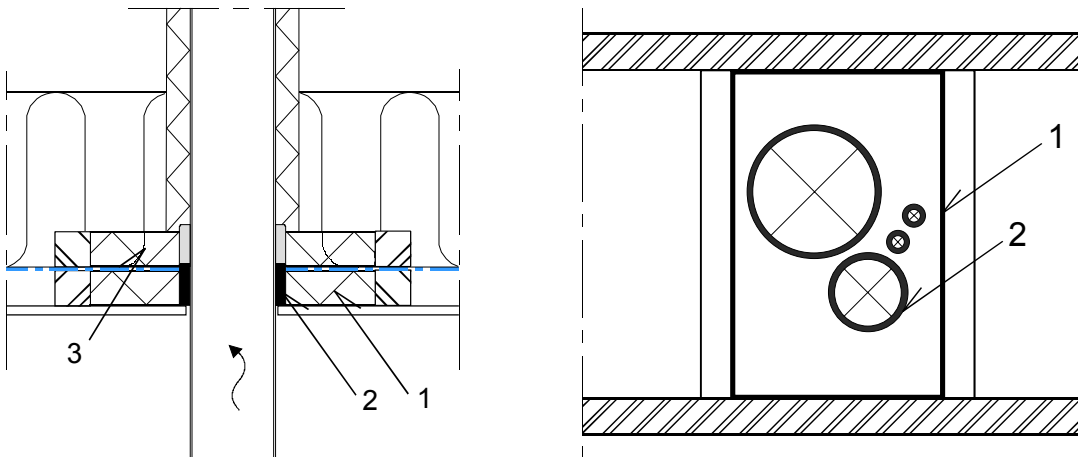
Kuva 7. Ikkunaliitosten tiivistäminen aiheuttaa ongelmia erityisesti hirsirakentamisessa, koska ikkunoiden yläpuolelle on jätettävä rakenteelle riittävä painumavara. Ikkunoiden nykyiset kiinnitystavat ovat periaatteiltaan riittävän tiiviitä, kun asennus- ja tiivistystyö suoritetaan huolellisesti.

## 8. Läpiviennit

Heikosti tiivistetyt läpiviennit aiheuttavat rakenteisiin huomattavia paikallisia ilmavuotoja. Julkaisussa läpivienneistä ohjeistettiin detaljikuville sekä yläpohjan putkiläpivientien (kuva 8) että hormiläpivientien (kuva 9) ratkaisuja. Työn huolellisuudella on suuri vaikutus läpiviennin ilmanpitävyyteen valitusta tiivistysmenetelmästä riippumatta.

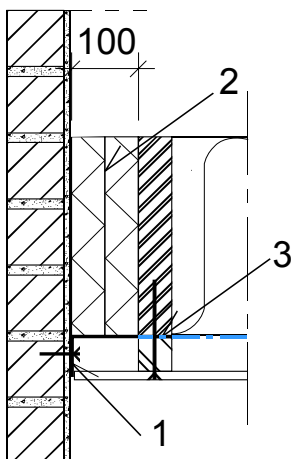
Mikäli putkiläpivientien tiivistykseen käytetään teippejä, käytettyjen tuotteiden riittävä tartunta ja pitkäaikaiskestävyys tulee varmistaa. Teippaus tulee mahdollisuuksien mukaan tehdä tiivistä pintaa vasten. Putkiläpiviennit voidaan tiivistää myös vaahdottamalla tai elastisella kitillä, mikäli ympäröivä pinta on riittävän jäykkä.

Putkiläpivientien tiivistämiseen on markkinoilla tarjolla erilaisia läpivientilaippoja, mutta nämä soveltuvat lähinnä yksittäisten putkien tiivistämiseen. Ongelmia aiheuttavat usean vierekkäisen putken läpiviennit. Näiden ilmanpitävyys voidaan toteuttaa puurankarakenteissa esimerkiksi tiivistämällä putket ilmanpitävään muovieristyslevyyn, kuten kuvassa 8 on esitetty.



Kuva 8. Puurakenteisen yläpohjan putkiläpivienti voidaan toteuttaa ilmanpitävästä muovieristyslevystä toteutetulla kauluksella. Oikealla tiivistystapa kuvattuna ylhäältä.

Mikäli läpivienti tehdään osastoivaan rakenneosaan, ei tiivistykseen voida käyttää tavallisia muovituotteita. Tällöin tulee käyttää hyväksytyjä palokatko tuotteita. Rakennuksen vaipparakenteilta ei kuitenkaan yleensä edellytetä osastoivuutta. Myös savuhormien läpivienneissä tulee ottaa huomioon palomääräysten asettamat rajoitukset.



Kuva 9. Puurakenteisen yläpohjan hormiläpivienti. Puurakenteen ja hormin väliin on jätettävä palomääräysten edellyttämä palamattoman eristeen kaista. Joillakin hormituotteilla on erillisiä hyväksyntöjä läpivientien paloturvalliseen toteuttamiseen.

## 9. Yhteenveto

Tässä työssä on esitetty tiivistettynä TTY:n tutkimusraportin 141 *Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa* [1] työvaiheita sekä raportin sisältö. Julkaisussa esitetään periaatteita ja esimerkkejä ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten suunnitteluun. Rakenteiden esimerkkikuvat on tehty pääasiassa pientalokohteista, mutta ratkaisujen periaatteita voidaan soveltaa myös muihin rakennuksiin. Julkaisussa esitetään seinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden ilmanpitävyyden kannalta oleellisia asioita. Liitoksista on esitetty ylä-, ala- ja välipohjan liittyminen ulkoseinään sekä ikkuna- ja oviliitosten ja läpivientien tiivistäminen. Lisäksi julkaisussa on esitetty märkätilojen ilmanpitävyyden ja kosteusteknisen toiminnan kannalta olennaisia ratkaisuja.

Ratkaisut on kehitetty TTY:n rakennetekniikan yksikön tutkijoista kootun asiantuntijaryhmän toimesta. Rakennesuunnittelijoiden toivotaan jatkavan ratkaisujen kehitystä esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Parantamalla rakennusvaipan ilmanpitävyyttä nykyisestä tasosta saavutetaan etuja etenkin rakennusten energiankulutuksen pienentyessä, kosteusvaurioiden vähentyessä ja sisäilmaston parantuessa. Nykyisillä lämmöneristepaksuuksilla vuotoilmanvaihdon vähentäminen on merkittävimpiä ja edullisimpia keinoja rakennusten energiatalouden parantamisessa. Ilmanpitävyyden parantamisessa olennaista on sekä yksittäisten rakennuskohteiden detaljien huolellinen suunnittelu että työn suunnitelmien mukainen toteutus.

## Kiitokset

Haluamme kiittää detaljien suunnitteluun osallistuneita TTY:n tutkijoita. Ryhmän puheenjohtajana toimi tekn. toht. Juha Vinha. Ryhmän muita jäseniä olivat prof. Ralf Lindberg, tekn. toht. Jussi Mattila, tekn. lis. Jukka Lahdensivu, dipl.ins. Jari Hietala, dipl.ins. Jommi Suonketo, dipl.ins. Minna Korpi, dipl.ins. Hanna Aho, dipl.ins. Kati Salminen ja dipl.ins. Kimmo Lähdesmäki. Kiitokset myös AISE -tutkimushankkeen johtoryhmän jäsenille ratkaisujen kommentoinnista työn aikana.

## Lähdeluettelo

- [1] Aho, H., Korpi, M. (toim.). 2009. *Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa*. ISBN 978-952-15-2071-6. ISSN 1797-9161. Tutkimusraportti 141, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- [2] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. ja Jokisalo, J., 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio.
- [3] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. ja Keto, M. 2009. *Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous*. Tutkimusraportti 140. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [4] 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*. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publication 658. 338 p. ISBN 978-952-15-1742-6. ISSN 1459-2045.



## Ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje teollisille talotoimittajille

Juha Vinha<sup>1</sup>, Jarek Kurnitski<sup>2</sup>, Minna Korpi<sup>1</sup> ja Jussi Mattila<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos, LVI-tekniikka

### Tiivistelmä

Teolliset talotoimittajat voivat jatkossa määrittää omille talotyypeilleen ns. ilmoitetun ilmavuotoluvun. Kun ilmoitettua ilmavuotolukua käytetään rakennuksen suunnitteluarvona, ei valmiissa rakennuksessa tarvitse tehdä ilmanpitävyyden tarkistusmittausta. Ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittäminen on kuvattu uudessa ilmanpitävyyden laadunvarmistusohjeessa, joka on tarkoitettu ensisijaisesti asuinrakennuksiin (pien- ja kerrostalot), mutta sitä voidaan soveltaa muihinkin vakioituilla rakenteilla ja toteutustavoilla tehtäviin rakennuksiin. Talotoimittaja voi käyttää ilmoitettua ilmavuotolukua ko. talotyypin kuuluvan rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuutta osoittaessa sekä energiankulutusta ja energiatehokkuuslukua määritettäessä.

Laadunvarmistusohjeessa esitetään ilmanpitävyyden laadunvarmistuksen periaatteet ja ilmavuotoluvun ilmoitusmenettelyn vaiheet. Rakennuksen hyvän ilmanpitävyyden saavuttamiseksi esitetään lisäksi ohjeistus ilmanpitävyyteen vaikuttavien tekijöiden, kuten rakenteellisten yksityiskohtien, rakennusprosessin, työnsuorituksen, rakennustavan ja työmaavalvonnan osalta. Yritykset voivat sisällyttää ohjeessa esitetyt periaatteet omaan laadunvarmistusjärjestelmäänsä ja valvoa niiden avulla kriittisten työvaiheiden asianmukaista suorittamista ja lopputuloksen laatua ilmanpitävyyden osalta.

Ohjeessa on myös esitetty periaatteet ilmavuotoluvun mittauksen toteuttamiseksi sekä pien- että kerrostaloissa. Ohjeet täydentävät standardissa SFS-EN 13829 annettuja ohjeita rakennuksen ilmavuotoluvun mittauksesta.

### 1. Johdanto

Vuoden 2008 alusta voimaan tulleissa rakentamismääräyksissä (vuoden 2007 rakentamismääräykset) vaipan ilmanpitävyys kuuluu rakennusosien lämmönläpäisykertoimien (U-arvojen) ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton ohella lämpöhäviöiden tasauslaskennan piiriin.

Ilmavuotoluvun suunnitteluarvona ( $n_{50, \text{suun}}$ ) voidaan laskelmissa aina käyttää rakentamismääräyksissä annettua ilmavuotoluvun arvoa, joka ei edellytä vielä rakennuksen ilmavuotoluvun mittausta. Tätä ilmavuotolukua voidaan kutsua mittausta edellyttävän ilmavuotoluvun raja-arvoksi ( $n_{50, \text{raja}}$ ) ja se on sekä vuoden 2007 että uusissa vuoden 2010 rakentamismääräyksissä 4,0 l/h [1; 2].

Tätä raja-arvoa pienemmän ilmavuotoluvun käyttäminen suunnittelussa edellyttää, että ko. arvo on osoitettu mittaamalla tai muulla menettelyllä [1; 2]. Rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuuden osoittamisessa ja energialaskennassa voidaan siis käyttää myös pienempää ilmavuotoluvun arvoa, jos sen saavutettavuus pystytään perustelemaan rakennusvalvonnalle.

Vuonna 2007 lähdettiin kehittämään ”Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous (AISE)” -projektin [3] yhteydessä laadunvalvontamenettelyä teollisille talotoimittajille siten, että rakennuksen ilmanpitävyyttä ei tarvitsisi osoittaa erikseen jokaisessa rakennuksessa. Tätä varten kehitettiin ilmoitusmenettely, jonka avulla talotoimittaja voi määrittää omille talotyypeilleen ns. ilmoitetun ilmavuotoluvun. Talotoimittaja voi käyttää ilmoitettua ilmavuotolukua ko. talotyyppiin kuuluvan rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuutta osoittaessa sekä energiankulutusta ja energiatehokkuuslukua määrittäessä.

Laadunvalvontaohjeen [4] perustana ovat erilaisille talotyypeille tehdyt ilmanpitävyydsmittaukset, joiden perusteella niille määritetään ilmoitettu ilmavuotoluku laskennallisesti. Ohjeen teon yhteydessä käytiin paljon keskustelua siitä, kuinka suuri otos on riittävä kuvaamaan ko. talotyyppiin ilmanpitävyyttä ja kuinka suuri painoarvo tulee asettaa mittaustulosten hajonnalle. Erityisen ongelmalliseksi ohjeen laatimisen teki kuitenkin se, että asuinrakennuksissa käytetään nykyisin hyvin erilaisia ratkaisuja ilmanpitävyyden toteuttamiseen. Ohjetta tehtäessä oli siis määritettävä, millaiset ilmanpitävyyden toteutusratkaisut ovat niin lähellä toisiaan, että niille ei tarvitse tehdä erillisiä ilmanpitävyydsmittauksia. Tätä tehtävää hankaloitti vielä se, että ohjeen oli tarkoitus palvella sekä pien- että kerrostalotuotantoa, jotka poikkeavat monilta osin merkittävästi toisistaan. Mm. näistä tekijöistä johtuen ohjeen laadintaprosessi kesti runsaat kaksi vuotta.

## 2. Laadunvarmistusohjeen sisältö

Laadunvarmistusohjeen [4] sisältö koostuu seuraavista pääluvuista:

1. Yleistä
2. Talotoimittajakohtainen arvo ilmavuotoluvulle (ilmoitusmenettely)
3. Ohjeita rakennusvaipan ilmanpitävyyden varmistamiseksi
4. Rakennuksen ilmavuotoluvun mittausta

Päälukujen lisäksi ohjeen alussa on määritelty keskeiset käsitteet, joita ohjeessa käytetään. Ohjeen lopussa olevissa liitteissä on esimerkkejä erillisiä ilmanpitävyydsmittauksia edellyttävistä toteutusratkaisuista, mitattavien kohteiden lukumäärien määrittämisestä sekä ilmoitettujen ilmavuotolukujen laskemisesta.

### 2.1 Yleistä

Luku 1 sisältää yleistä asiaa rakennuksen ilmanpitävyydestä, ilmanpitävyyden suunnitteluarvon valinnasta, ilmanpitävyyden vaikutuksista rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä ilmanvaihdon merkityksestä tiiviissä rakennuksessa.

Vaipan ilmanpitävyyden parantaminen edesauttaa rakennuksen ja rakenteiden toimintaa monilla tavoin. Energiankulutuksen vähenemisen lisäksi vaipan hyvä ilmanpitävyys parantaa myös sisäilman laatua, koska vedontunne vähenee ja mahdollisten homeiden, epäpuhtauksien ja haitallisten aineiden kulkeutuminen vaipparakenteista ja maaperästä sisäilmaan vähenee. Lisäksi hyvä ilmanpitävyys parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, koska kostea sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin ja toisaalta siksi, että kylmä ulkoilma ei pääse jäähdyttämään rakennetta ja aiheuttamaan materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin homeen kasvulle otollisia olosuhteita tai kosteuden tiivistymisriskiä.

Luvussa korostetaan sitä, että alhaista ilmavuotoluvun arvoa tulisi ensisijaisesti käyttää rakennuksen energiatehokkuutta parantavana tekijänä heikentämättä vaipan lämmöneristystä tai lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Jos ilmavuotoluvun suunnitteluarvo on valittu pieneksi ja sitä

# Ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje teollisille talotoimittajille

Juha Vinha<sup>1</sup>, Jarek Kurnitski<sup>2</sup>, Minna Korpi<sup>1</sup> ja Jussi Mattila<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos, LVI-tekniikka

## Tiivistelmä

Teolliset talotoimittajat voivat jatkossa määrittää omille talotyypeilleen ns. ilmoitetun ilmapuotoluvun. Kun ilmoitettua ilmapuotolukua käytetään rakennuksen suunnitteluarvona, ei valmiissa rakennuksessa tarvitse tehdä ilmanpitävyyden tarkistusmittausta. Ilmoitetun ilmapuotoluvun määrittäminen on kuvattu uudessa ilmanpitävyyden laadunvarmistusohjeessa, joka on tarkoitettu ensisijaisesti asuinrakennuksiin (pien- ja kerrostalot), mutta sitä voidaan soveltaa muihinkin vakioituilla rakenteilla ja toteutustavoilla tehtäviin rakennuksiin. Talotoimittaja voi käyttää ilmoitettua ilmapuotolukua ko. talotyypin kuuluvan rakennuksen lämpöhäviön määrysten mukaisuutta osoittaessa sekä energiankulutusta ja energiatehokkuuslukua määritettäessä.

Laadunvarmistusohjeessa esitetään ilmanpitävyyden laadunvarmistuksen periaatteet ja ilmapuotoluvun ilmoitusmenettelyn vaiheet. Rakennuksen hyvän ilmanpitävyyden saavuttamiseksi esitetään lisäksi ohjeistus ilmanpitävyyteen vaikuttavien tekijöiden, kuten rakenteellisten yksityiskohtien, rakennusprosessin, työnsuorituksen, rakennustavan ja työmaavalvonnan osalta. Yritykset voivat sisällyttää ohjeessa esitetyt periaatteet omaan laadunvarmistusjärjestelmäänsä ja valvoa niiden avulla kriittisten työvaiheiden asianmukaista suorittamista ja lopputuloksen laatua ilmanpitävyyden osalta.

Ohjeessa on myös esitetty periaatteet ilmapuotoluvun mittauksen toteuttamiseksi sekä pien- että kerrostaloissa. Ohjeet täydentävät standardissa SFS-EN 13829 annettuja ohjeita rakennuksen ilmapuotoluvun mittauksesta.

## 1. Johdanto

Vuoden 2008 alusta voimaan tulleissa rakentamismääräyksissä (vuoden 2007 rakentamismääräykset) vaipan ilmanpitävyys kuuluu rakennusosien lämmönläpäisykertoimien (U-arvojen) ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton ohella lämpöhäviöiden tasauslaskennan piiriin.

Ilmapuotoluvun suunnitteluarvona ( $n_{50, \text{suun}}$ ) voidaan laskelmissa aina käyttää rakentamismääräyksissä annettua ilmapuotoluvun arvoa, joka ei edellytä vielä rakennuksen ilmapuotoluvun mittausta. Tätä ilmapuotolukua voidaan kutsua mittausta edellyttävän ilmapuotoluvun raja-arvoksi ( $n_{50, \text{raja}}$ ) ja se on sekä vuoden 2007 että uusissa vuoden 2010 rakentamismääräyksissä 4,0 l/h [1; 2].

Tätä raja-arvoa pienemmän ilmapuotoluvun käyttäminen suunnittelussa edellyttää, että ko. arvo on osoitettu mittaamalla tai muulla menettelyllä [1; 2]. Rakennuksen lämpöhäviön määrysten mukaisuuden osoittamisessa ja energialaskennassa voidaan siis käyttää myös pienempää ilmapuotoluvun arvoa, jos sen saavutettavuus pystytään perustelemaan rakennusvalvonnalle.

ilmanpitävyyden kannalta toisistaan niin paljon, että niistä tarvitaan tutkimukseen oma vähintään kuuden rakennuksen otos.

Eri toteutusratkaisut voidaan yhdistää samaan talotyyppiin, jos ratkaisujen ilmoitetut ilmavuotoluvut ovat erikseen laskettuna alle mittausta edellyttävän ilmavuotoluvun raja-arvon ja lisäksi enintään 0,5 1/h suurempia kuin talotyypin yhdistetty ilmoitettu ilmavuotoluku.

Olemassa olevaan talotyyppiin voidaan myöhemmin lisätä uusia toteutusratkaisuja. Tässäkin tapauksessa ulkopuolinen taho arvioi ohjeessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti, poikkeavatko uudet ratkaisut aikaisemmista niin paljon, että uudet ilmanpitävyydsmittaukset ovat tarpeellisia. Jos uusia mittauksia tarvitaan, uudella toteutusratkaisulla tehdyistä kohteista mitataan vähintään kuusi (6) rakennusta. Nämä mittaukset tekee aina ulkopuolinen taho.

Talotyypistä voidaan haluttaessa myös poistaa siihen aiemmin kuuluneita toteutusratkaisuja. Tässä tapauksessa talotyypin uusi yhdistetty ilmoitettu ilmavuotoluku määritetään jäljelle jäävien toteutusratkaisujen ilmoitettujen ilmavuotolukujen keskiarvona.

Rakennuksia, joissa on sellaisia vaipan osia, jotka eivät sisälly talotyypissä määriteltyihin rakenteisiin tai joita ei voida liittää talotyyppiin mukaan (esimerkiksi osittain tai kokonaan maan alla oleva kellarikerros), ei saa valita mukaan ko. talotyypin tutkimuksen tai seurannan yhteydessä mitattaviin rakennuksiin.

Tietyn talotyypin mukaiselle rakennukselle, johon on liitetty sellaisia vaipan osia, jotka eivät sisälly talotyypissä määriteltyihin rakenteisiin, voidaan määrittää ilmavuotoluku vaipan pinta-alojen suhteessa painotettuna keskiarvona. Aluksi lasketaan talotyyppiin kuuluvien ja talotyyppiin kuulumattomien vaipan osien sisäpinta-alat ja tämän jälkeen määritetään näiden pinta-alojen suhteessa ilmavuotoluvun keskiarvo koko vaipalle. Laskentaa varten on määritettävä myös talotyyppiin kuulumattomille vaipan osille ilmavuotoluvun arvot. Jos toinen talotoimittaja on määrittänyt ko. vaipan osalle ilmoitetun ilmavuotoluvun arvon, voidaan laskelmassa käyttää tätä arvoa. Muussa tapauksessa laskelmissa käytetään mittausta edellyttävän ilmavuotoluvun raja-arvoa. Talotoimittajan on lisäksi annettava ohjeet hankkeeseen ryhtyvälle tai hänen valtuuttamalleen taholle talotyyppiin kuuluvien ja kuulumattomien vaipan osien välisten liittymäkohtien tiivistämisestä.

### 2.2.2 Ilmoitus

Tutkimuksessa mitattujen ilmavuotolukujen perusteella lasketaan kullekin talotyyppille tai toteutusratkaisulle ilmoitettu ilmavuotoluku ( $n_{50,ilm}$ ) [1/h] kaavalla 1. Ilmoitetussa ilmavuotoluvussa otetaan huomioon mitattujen kohteiden lukumäärä ja mittaustulosten keskihajonta.

$$n_{50,ilm} = \overline{n_{50}} + k \cdot s_{n50} \quad (1)$$

missä  $\overline{n_{50}}$  = talotyypin tai toteutusratkaisun mitattujen rakennusten ilmavuotolukujen keskiarvo (1/h)  
 $k$  = kerroin, joka riippuu mitattujen rakennusten lukumäärästä (-)  
 $s_{n50}$  = talotyypin tai toteutusratkaisun mitattujen rakennusten ilmavuotolukujen keskihajonta (1/h)

Keskihajonta  $s_{n50}$  lasketaan kaavalla:

$$s_{n50} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (n_{50,i} - n_{50})^2}{n-1}} \quad (2)$$

missä  $n_{50,i}$  = yksittäinen rakennuksen ilmavuotoluvun mittaustulos (1/h)  
 $n$  = talotyypin tai toteutusratkaisun mitattujen rakennusten lukumäärä

Kerroin  $k$  lasketaan kaavasta:

$$k = 0,674 + \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Kaavan 3 perustana on normaalijakauman mukaisessa otoksessa 25 % fraktiili ja 84 % luotettavuustaso. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkasteltavan talotyypin kaikista rakennuksista 75 % täyttää ilmoitetun ilmavuotoluvun arvon 84 % varmuudella. Näin ollen kaikki tiettyyn talotyyppiin kuuluvat rakennukset eivät täytä talotyyppille määritettyä ilmoitetun ilmavuotoluvun arvoa. Erot ovat kuitenkin yleensä pieniä.

Ilmoitetun ilmavuotoluvun arvo annetaan 0,1 1/h tarkkuudella ja pyöristetään normaalien pyöristyssääntöjen mukaisesti. Kun ilmoitettu ilmavuotoluku lasketaan talotyyppille, joka koostuu useammasta eri toteutusratkaisusta, käytetään laskelmissa ilmavuotolukujen keskiarvojen tarkkoja arvoja ja pyöristys tehdään vasta lopulliseen ilmoitetun ilmavuotoluvun arvoon.

Kaikki tutkimuksessa mitatut rakennusten ilmavuotoluvut otetaan mukaan talotyypin ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittämiseen lukuun ottamatta sellaisia kohteita, joista ei ole kyetty saamaan riittävän luotettavaa mittaustulosta. Sama pätee myös seurannan yhteydessä tehdyille mittauksille. Jos sama talotyyppi sisältää vaipan osien tai liitosten toteutuksen kannalta vaihtoehtoisia toteutusratkaisuja, ilmoitettu ilmavuotoluku lasketaan ensin kullekin ratkaisulle erikseen ja näiden ilmavuotolukujen keskiarvo on talotyypin yhdistetty ilmoitettu ilmavuotoluku. Tällöin eri ratkaisuilla toteutettuja rakennuksia voidaan mitata tutkimuksen yhteydessä myös toisistaan poikkeava lukumäärä. Sama laskentaperiaate on voimassa myös seurannan yhteydessä tehdyille ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittämiselle.

Talotoimittaja voi käyttää talotyypin ilmoitettuna ilmavuotolukuna myös suurempaa arvoa, kuin tämän ohjeen mukaan määritetty arvo.

### 2.2.3 Seuranta

Talotyypin ilmanpitävyyden seuranta tapahtuu kolmen vuoden jaksoissa, joista ensimmäinen alkaa ko. talotyyppiä koskevan tutkimuksen valmistuttua. Talotoimittaja tai hänen valtuuttamansa ulkopuolinen taho tekee kunkin talotyypin seurantamittaukset ja määrittää niiden perusteella talotyypeille uudet ilmoitetun ilmavuotoluvun arvot seuraavan seurantajakson ajaksi. Mittauksista ja ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittämisestä tehdään jokaisella seurantajaksoilla seurantaraportti. Raporttiin tulee kirjata myös talotyypin toteutusratkaisuihin tehdyt muutokset seurantajakson aikana. Jos talotoimittaja tekee seurantamittaukset itse, hänellä on myös aina oltava ulkopuolinen taho laadunvalvojana, joka valitsee kullakin seurantajaksoilla mitattavat kohteet ja tarkistaa seurantaraportin sisällön. Talotoimittaja antaa listan seurantajakson aikana

valmistuneista kunkin talotyypin ja toteutusratkaisun rakennuksista ulkopuoliselle taholle kohteiden valintaa varten. Lisäksi rakennusvalvonta voi pyytää perustellusta syystä haluamiensa lisäkohteiden mittausta riippumatta siitä tekeekö talotoimittaja tai ulkopuolinen taho seurantamittaukset. Kaikki seurantajaksolla mitatut kohteet otetaan huomioon uutta ilmoitettua ilmavuotolukua määritettäessä.

Seurantajakson aikana mitataan satunnaisesti eri asentajat ja mahdollisuuksien mukaan eri maantieteelliset alueet huomioon ottaen vähintään kolme (3) kpl jokaisen talotyypin rakennuksista, jotka valmistuvat ko. jakson aikana. Jos talotyyppi sisältää useita eri toteutusratkaisuja, jotka ovat edellyttäneet tutkimuksen yhteydessä vähintään kuuden rakennuksen otoksen mittausta, tulee jokaisesta tällaisesta ratkaisusta mitata seurantajaksolla vähintään kolme (3) rakennusta. Jos talotyyppiin tai seurantamittausta edellyttäviin toteutusratkaisuihin kuuluvia rakennuksia tehdään seurantajakson aikana vähemmän kuin kolme kappaletta, seurantajaksoa pidennetään niin, että seurantaan saadaan kustakin ratkaisusta vähintään kolme rakennusta.

Jos talotoimittaja tekee seurantamittaukset itse, laadunvalvojana toimiva ulkopuolinen taho tekee tarkistuspäätökset vähintään kolmessa (3) talotoimittajan mittaamassa kohteessa jokaisella seurantajaksolla. Kohteet voivat kuulua samaan tai eri talotyyppiin. Ulkopuolinen taho valitsee tarkistettavat kohteet talotoimittajan antaman listan perusteella. Ulkopuolinen taho analysoi eri tahojen tekemien seurantamittausten keskinäiset erot ja antaa tarvittaessa lisäohjeita talotoimittajalle mittausten suorittamista varten. Talotoimittaja voi ottaa käyttöön uudet ilmoitetun ilmavuotoluvun arvot seuraavalle seurantajaksolle vasta sitten, kun ulkopuolinen taho on hyväksynyt niiden perustana olevien seurantamittausten toteutuksen sekä ilmoitettujen ilmavuotolukujen laskennallisen määrityksen.

Seurantamittausten yhteydessä ilmoitettu ilmavuotoluku lasketaan käyttämällä kaavassa 1 kertoimen  $k$  arvona samaa arvoa, kuin on käytetty ko. talotyypin tutkimuksen yhteydessä. Tällöin seurantamittausten perusteella laskettu ilmoitetun ilmavuotoluvun arvo on vertailukelpoinen tutkimuksesta saadun arvon kanssa.

Jos seurantamittausten perusteella laskettu talotyyppin ilmoitettu ilmavuotoluku poikkeaa aiemmin saadusta ilmavuotoluvusta, talotoimittaja voi mitata tai pyytää ulkopuolisen tahon mittaamaan vielä lisää kohteita saadakseen kattavamman kuvan talotyyppin ilmanpitävyydestä. Jos talotyyppin ilmoitettu ilmavuotoluku poikkeaa lisämittaustenkin jälkeen aiemmasta ilmavuotoluvusta, muutetaan talotyyppin ilmoitettu ilmavuotoluku seuraavaksi kolmen vuoden ajanjaksoksi vastaamaan seurantamittausten perusteella saatua arvoa.

Jos seurantamittausten yhteydessä todetaan, että talotyyppin ilmoitettu ilmavuotoluku on noussut yli mittausta edellyttävän ilmavuotoluvun raja-arvon, ko. talotyyppille käytetään seuraavalla kolmen vuoden seurantajaksolla tätä ilmavuotoluvun raja-arvoa. Jos talotyyppi koostuu useista toteutusratkaisuksista, jotka ovat edellyttäneet tutkimuksen yhteydessä vähintään kuuden rakennuksen otoksen mittausta, ja jonkun ratkaisun ilmoitettu ilmavuotoluku erikseen laskettuna nousee yli mittausta edellyttävän ilmavuotoluvun raja-arvon, ei tätä ratkaisua saa liittää mukaan ko. talotyyppiin seuraavalla kolmen vuoden seurantajaksolla. Vastaavasti, jos jonkin toteutusratkaisun ilmoitettu ilmavuotoluku erikseen laskettuna ylittää talotyyppin yhdistetyn ilmoitetun ilmavuotoluvun enemmän kuin  $0,5 \text{ l/h}$ , ei tätä ratkaisua saa liittää ko. talotyyppiin mukaan, vaan sille käytetään omaa ilmoitettua ilmavuotolukua seuraavalla kolmen vuoden seurantajaksolla. Jos talotyyppin määritelmässä esitetyt kriteerit täyttyvät eri toteutusratkaisujen osalta uudestaan myöhemmin, ne voidaan yhdistää jälleen saman talotyypin alle.

Ilmoitetun ilmapuotoluvun pohjana oleva tutkimusraportti ja viimeisimmän seurantajakson raportti on esitettävä pyydettyä rakennushankkeeseen ryhtyvälle, rakennuksen käyttäjälle, omistajalle, valvojalle ja rakennusvalvonnan edustajalle.

### *Vanhojen rakennusten seurantamittaukset*

Rakennuksen ilmanpitävyys voi heikentyä joissakin tapauksissa merkittävästi ajan kuluessa. Toisaalta rakennuksen ilmapuotoluku voi myös pienentyä rakojen ja reikien tiivistymisestä johtuen (esimerkiksi hirsirakennuksilla). Jotta ilmanpitävyyden heikkenemistä voitaisiin välttää, on suositeltavaa, että seurannan yhteydessä mitataan uudestaan myös aiemmin mitattuja kohteita. Tällöin talotoimittaja saa tietoa ilmanpitävyyden pitkäaikaispysyvyydestä eri toteutusratkaisuisissa. Laadunvalvontaohjeessa on annettu yksityiskohtaisempia ohjeita vanhojen kohteiden mittauksien suorittamiseksi.

## **2.3 Ohjeita rakennusvaipan ilmanpitävyyden varmistamiseksi**

Luvussa 3 annetaan ohjeita, jotka edesauttavat rakennuksen hyvän ilmanpitävyyden saavuttamista. Luvussa käydään läpi rakennusprosessin ja valvonnan merkitystä hyvän ilmanpitävyyden saavuttamisessa ja annetaan rakenteellisia ohjeita, joilla rakennusvaipan ilmanpitävyyttä voidaan parantaa. Yritykset voivat sisällyttää tässä luvussa esitetyt periaatteet omaan laadunvarmistusjärjestelmäänsä ja valvoa niiden avulla kriittisten työvaiheiden asianmukaista suorittamista ja lopputuloksen laatua ilmanpitävyyden osalta.

Laadunvalvontaohjeessa annettujen rakenteellisten ohjeiden lisäksi AISE-projektin yhteydessä on tehty myös laajempi ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutusohje asuinrakennuksia varten [6].

## **2.4 Rakennuksen ilmapuotoluvun mittaus**

Luvussa 4 käydään läpi painekokeen toteutuksen periaatteet. Ohjeet täydentävät standardissa SFS-EN 13829 [5] annettuja ohjeita ilmapuotoluvun mittauksesta.

Ilmapuotoluvun mittauksen yhteydessä tarkastellaan seuraavia asioita:

1. Ilmapuotoluvun mittaustavat ja -menetelmät
2. Painekokeen toteutus ja ilmapuotolukujen laskenta
3. Rakennuksen ja huoneiston ilmatilavuuden laskenta
4. Ilmanpitävyysraportin sisältö
5. Mittauslaitteiden tarkkuus ja kalibrointi

Ilmapuotoluku mitataan standardissa SFS-EN 13829 [5] esitetyllä mittausmenetelmällä B (rakennuksen vaipan testaus) siten, että rakennukseen tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot (ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmakanavat, korvausilmaventtiilit), tulisijat ja hormit suljetaan tiiviisti teippaamalla tai muulla luotettavalla tavalla. Myös ovien ja ikkunoiden tulee olla kiinni mittauksen aikana.

Ilmapuotoluvun mittaus tapahtuu sitä varten tehdyllä painekoelaitteistolla tai vaihtoehtoisesti rakennuksen omilla ilmanvaihtolaitteilla. Ilmapuotoluku tulisi määrittää ensisijaisesti painekoelaitteistolla, koska sillä saatu mittausulos on luotettavampi.

Painekokeessa määritetään ilman tilavuusvirta, joka täytyy puhaltaa rakennukseen (ylipainekoe) tai sieltä pois (alipainekoe), jotta rakennuksen ulkovaipan yli saadaan haluttu paine-ero. Ilman tilavuusvirrat määritetään portaittain eri paine-eroilla vähintään 50 Pa paine-eroon asti.

Ilmavuotoluku,  $n_{50}$ -luku [1/h], voidaan laskea kaavalla:

$$n_{50} = \frac{\dot{V}}{V} \quad (4)$$

missä  $\dot{V}$  = ilman tilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa paine-eron aiheuttamiseksi rakennuksen vaipan yli ( $\text{m}^3/\text{h}$ )  
 $V$  = rakennuksen sisätilavuus ( $\text{m}^3$ )

Rakennuksen ilmavuotoluku voidaan määrittää myös vaipan pinta-alaa kohti  $q_{50}$ -lukuna ( $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ).  $q_{50}$ -luku voidaan laskea  $n_{50}$ -luvusta kaavalla:

$$q_{50} = n_{50} \frac{V}{A_E} \quad (5)$$

missä  $A_E$  = rakennuksen vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna ( $\text{m}^2$ )

Rakennuksen ilmavuotoluku voidaan määrittää myös alle 50 Pa paine-erolla, jos painekokeessa saavutetaan vähintään 30 Pa paine-ero ja mittaukset on tehty portaittaisesti tasaisin välein vähintään kolmella eri paine-erolla. Kesäaikana (ulkolämpötilan ollessa  $\geq 15$  °C) ja tuulettomalla säällä (tuulen nopeus  $\leq 1$  m/s) voidaan hyväksyä myös vähintään 20 Pa paine-ero. 50 Pa paine-eroa vastaava ilmavuotoluku määritetään alemmissa paine-eroissa saaduista mittaustuloksista logaritmisella asteikolla lineaarisesti ekstrapoloimalla.

Painekoe on suositeltavaa tehdä sekä yli- että alipainetilanteessa, koska vaipan ilmavuotoluku voi muuttua merkittävästi paine-eron suunnan muuttuessa. Esimerkiksi osa ilmansulun vuotokohdista voi sulkeutua tai avautua riippuen ilman virtaussuunnasta.

Rakennuksen mitattavaan tilaan otetaan mukaan kaikki tilat, jotka ovat selvästi ilmanpitävän vaipan sisäpuolella. Yleensä mitattavaan tilaan kuuluvat kaikki lämmitetyt ja jäähdytetyt tilat sekä tilat, joissa on koneellinen ilmanvaihto. Osassa rakennusta tehtävissä paine-eromittauksissa mitattavaan tilaan otetaan pääsääntöisesti mukaan kaikki saman palo-osaston sisällä olevat tilat. Jos mitattavaan tilaan liittyy tila, joka on erikseen lämmitetty tai jäähdytetty ja sen ulkovaippa on lämmöneristetty, mutta se on selvästi ilmanpitävän vaipan ulkopuolella eikä tilan vaipparakenteissa ole tiivistä ilmansulkua, tila jätetään mittauksen ulkopuolelle. Tällöin mitattavasta tilasta tähän tilaan johtavat ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot tiivistetään ja tilaan johtavat kulkuaukot suljetaan.

Rakennuksen ja huoneiston ilmatilavuuden laskenta poikkeaa joiltakin osin standardissa SFS-EN 13829 ja RakMK D5:ssä [7] esitetystä ohjeista. Ilmatilavuuteen otetaan mukaan myös alle 160 cm olevien tilojen sekä väliseinien ilmatilavuus.

Uusissa taloissa ilmavuotoluvun mittaus on suositeltavaa tehdä siinä vaiheessa rakentamista, kun kaikki ulkovaipan ilmanpitävyyteen vaikuttavat rakennustyöt on tehty valmiiksi, mutta vaipan



mahdollista lisätiivistämistä voidaan vielä suorittaa. Jos ilmavuotoluvun suunnitteluarvoa on käytetty lämpöhäviöiden kompensoinnissa ja mittaustulos poikkeaa suunnitteluarvosta huomompaan suuntaan, tehdään lisätiivistäminen ja uusintamittaus, ja tarvittaessa tätä jatketaan, kunnes päästään suunnitteluarvon mukaiselle tasolle.

Ilmanpitävyydsmittauksesta laaditaan raportti, jossa esitetään vähintään Tasauslaskentaoppaassa 2007 [8] luetellut tiedot:

Useita huoneistoja sisältävän pientalon (pari- tai rivitalo) ilmavuotoluku voidaan määrittää mittaamalla ilmanpitävyys vähintään yhdestä huoneistosta. Rivitalossa mitattavan huoneiston tulee olla päätyhuoneisto, jotta mitattava tila rajoittuisi mahdollisimman suurelta osalta ulkovaippaan. Myös siinä tapauksessa, että rivitalosta mitataan useampia huoneistoja, vähintään yhden niistä tulee olla päätyhuoneisto. Kun pientalosta mitataan useampia huoneistoja, sen ilmavuotoluku on huoneistoista saatujen mittaustulosten keskiarvo.

Kerrostaloissa ilmanpitävyys mitataan joko yksittäisistä huoneistoista, yhdestä tai useammasta kokonaisesta portaasta tai koko rakennuksesta. Eri menetelmillä mitattuja kerrostaloja voidaan käyttää saman talotyypin ilmoitetun ilmavuotoluvun määrittämiseen. Jos mittaus tehdään yksittäisistä huoneistoista tai useammasta kokonaisesta portaasta, kerrostalon ilmanpitävyys on saatujen mittaustulosten keskiarvo.

Yksittäisten huoneistojen mittauksessa ei eritellä ulkovaipan ja huoneistojen välisiä ilmavuotoja, joten koko portaan tai koko rakennuksen ilmanpitävyyden mittaus antaa tältä osin tarkemman tuloksen kerrostalon ulkovaipan ilmanpitävyydestä. Toisaalta koko portaan tai koko rakennuksen ilmanpitävyyden mittaus muuttaa yleensä merkittävästi rakennuksen sisätilavuuden ja vaipan sisäpinta-alan välistä suhdetta ( $V/A_E$ ) verrattuna yksittäisten huoneistojen mittaukseen. Tämä pienentää yleensä  $n_{50}$ -luvun arvoa, vaikka ulkovaipan ilmanpitävyys ei todellisuudessa paranekaan. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että kerrostalon ilmanpitävyydestä saadaan riittävän hyvä kuva sekä yksittäisten huoneistojen mittauksella että koko portaan tai koko rakennuksen mittauksella.

Ilmavuotoluvun määrittäminen yksittäisten huoneistojen mittaustuloksista edellyttää yhteensä vähintään kolmen (3) huoneiston mittausta kustakin talosta. Huoneistot tulee mitata eri kerroksista siten, että vähintään yksi huoneisto mitataan alimmasta ja ylimmästä kerroksesta ja lisäksi mitataan vähintään yksi huoneisto joka toisesta välikerroksesta. Laadunvalvontaohjeessa on annettu myös yksityiskohtaisempia ohjeita mittausten suorituksista kerrostalon yksittäisissä huoneistoissa tai vaihtoehtoisesti koko portaassa tai koko rakennuksessa.

### 3. Kiitokset

Ilmanpitävyyden laadunvarmistusohjeet on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen/ Rakennetekniikan ja Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen/ LVI-tekniikan yhteistyöprojektissa: Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous, AISE. Ohjeen teossa on hyödynnetty myös muiden projektien yhteydessä ja käytännön kokemusten perusteella saatuja tuloksia.

Laadunvarmistusohjetta on työstetty erillisessä työryhmässä, jossa on ollut mukana Ympäristöministeriön, rakennusvalvonnan ja yritysten edustajia. Ilmanpitävyyden varmistamiseksi annetut rakenteelliset ohjeet on laadittu TTY:n Rakennustekniikan laitoksen

asiantuntijatyöryhmässä. Laadunvarmistusohjetta on käsitelty AISE-projektin johtoryhmässä, johon kuului Ympäristöministeriön ja TEKES:n edustajien lisäksi laaja joukko rakennusalan yritysten ja yhdistysten edustajia. Tämän lisäksi ohje on käynyt useilla laajemmilla lausuntokierroksilla. Kirjoittajat esittävät parhaat kiitokset kaikille, jotka ovat osallistuneet tämän laadunvarmistusohjeen sisällön kommentointiin ja parantamiseen.

#### 4. Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitetyn ilmanpitävyyden laadunvarmistusohjeen avulla teollisesti valmistetuille talotyypeille voidaan määrittää ilmoitettu ilmanvuotoluku, jota käytetään ko. talotyypin energiaselvitystä tehtäessä. Ilmoitetun ilmanvuotoluvun käyttö edellyttää ilmoitusmenettelyä, joka koostuu tutkimuksesta, ilmoituksesta ja seurannasta. Ilmoitetun ilmanvuotoluvun avulla talotyypin hyvää ilmanpitävyyttä voidaan hyödyntää lämmöneristys- ja energialaskelmissa ilman, että jokaisen rakennuksen ilmanpitävyyttä tarvitsee mitata erikseen.

#### Lähdeluettelo

- [1] RakMK D3. 2007. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 10 s.
- [2] RakMK D3. 2008. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 14 s.
- [3] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilma- ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 140. 148 s. + 19 liites.
- [4] RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustieto Oy. 24 s.
- [5] SFS-EN 13829: 2000. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 23 p.
- [6] Aho, H. & Korpi, M. (toim.). 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 141. 100 s.
- [7] RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö. 72 s.
- [8] Tasaaslaskentaopas 2007. 2008. Rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuuden osoittaminen. Ympäristöministeriö. 107 s.

## **11. Energian tuotto ja käyttö**



## **Aurinkopaneleista aurinkoteknisen toiminnallisuuden sisältäviin rakennusosiin**

Mikko Juntunen  
Naps Systems Oy

### **Tiivistelmä**

Naps Systems Oy toimittaa korkealuokkaisia aurinkosähköjärjestelmiä.

Aurinkosähkön tuotantolaitoksessa ei ole liikkuvia osia, se ei vaadi mitään polttoainetta eikä tuota minkäänlaisia päästöjä tai meteliä.

Eteläisessä Suomessa aurinkosähköjärjestelmän voi odottaa tuottavan noin 800 – 900 kWh sähköä kutakin asennettua kWp kohden. Järjestelmäkomponenttien hintaeroosion vuoksi aurinkosähkön hinta alittaa lähivuosina verkosta ostettavan sähkön hinnan joillakin alueilla. Suomessa aurinkosähkön hinnaksi muodostuu nyt noin 0,40 €/kWh.

Aurinkosähköisen toiminnallisuuden integroiminen suoraan rakennukseen jo rakennusvaiheessa vähentää ulkopuolelta ostettavan sähkön määrää, joten se nopeuttaa rakennusinvestoinnin takaisinmaksua. Koska aurinkopanelit ovat sellaisenaan vesitiiviitä ja kestäviä, niillä voidaan korvata muita rakennusmateriaaleja ja saada aikaan monipuolisia visuaalisia ratkaisuja.

### **1. Johdanto**

Tässä artikkelissa tarkastellaan aurinkosähköjärjestelmän integroimista rakennukseen. Artikkelin keskittyy ainoastaan yleiseen sähköverkkoon kytkettäviin aurinkosähköjärjestelmiin.

Taustaksi esitellään Naps Systems Oy, määritellään alan keskeistä termistöä sen verran kuin artikkelin kannalta on välttämätöntä ja kuvataan lyhyesti aurinkosähkömarkkinoiden tilannetta. Esimerkkeinä aurinkosähköjärjestelmistä rakennuksissa esitellään joitakin tyypillisiä asennuksia jotka on lisätty rakennukseen. Lopuksi tarkastellaan itse rakennusmateriaaleihin integroituvan aurinkosähköjärjestelmän etuja ja mahdollisuuksia sekä esitellään kaksi esimerkkikohtetta.

### **2. Naps Systems Oy aurinkosähkömarkkinoilla**

Naps Systems Oy toimittaa asiakkailleen korkealuokkaisia aurinkosähköjärjestelmiä. Naps on 1980 –luvulta alkaen toimittanut yli 200.000 aurinkosähköjärjestelmää yli 120 maahan kaikille mantereille.

Nykyisin täysin aurinkosähköjärjestelmiin keskittyvä yhtiö on markkinajohtaja Skandinaviassa ja globaalisti merkittävä toimija verkosta riippumattomien järjestelmien toimittajana. Naps on tunnettu erityisesti kyvystään tarjota ratkaisuja kaikkein haastavimpiin kohteisiin. Naps on toimittanut aurinkosähköjärjestelmiä mm. sähköverkon ulottumattomissa oleville televerkon tukiasemille, öljy- ja kaasuputkien korroosiosuojaukseen sekä kylien, sairaaloiden ja koulujen sähköistyksiin kehitysmaissa.

Naps on toiminut uudisraivaaja-asemassa myös verkkoon liitettyjen ja rakennuksiin integroitujen järjestelmien toimittajana erityisesti Skandinaviassa ja asemoitunut hyvin alan kehittyville markkinoille keski-Euroopassa. Sisaryhtiöidensä kautta Naps Systems on myös vahvasti mukana Saksan asennusmarkkinoilla sekä aurinkopaneelien valmistuksessa.

Tässä artikkelissa keskitytään verkkoon kytkettyihin järjestelmiin.

### 3. Aurinkosähkö ja sähkömarkkinat

Aurinkosähköalalla käytetään termiä Wp, Watt peak, huipputeho, joka tarkoittaa esimerkiksi aurinkopanelin kirkkaissa standardiololoissa tuottamaa tehoa. Standardiksi on määritelty tuotettu teho kun 25 °C lämpötilassa olevalle panelille kohdistetaan kohtisuora  $1\text{kW/m}^2$  säteilytys, spektrillä joka auringonvalolla on sen kuljettua 1,5 ilmakehän paksuuden läpi. Tuotteet hinnoitellaan ja järjestelmien koosta puhutaan näissä yksiköissä.

Esimerkiksi yksittäiset aurinkopanelit ovat tyypillisesti kokoluokkaa 50-250 Wp. Omakotitalon mittakaavaa oleva verkkonkytketty järjestelmä on kokoluokkaa 1-5 kWp. Suomen tällä hetkellä suurin, Naps Systemsin toimittama aurinkosähköjärjestelmä on Kiilto Oy:n katolla Lempäälässä oleva 66,4 kWp laitos ja maailman suurimmat aurinkosähkökentät ovat 50 MWp luokkaa.

Sähköntuotantoa tarkasteltaessa on selvää, että kun aurinko ei jatkuvasti paista, 1 Wp asennettua aurinkosähköä ei tuota 1 W jatkuvaa tehoa. Tuotettava teho riippuu olennaisesti siitä, missä päin maailmaa, millaisissa sääoloissa ja missä asennossa aurinkopaneli on. Panelin teknisistä yksityiskohdista ja nimellistehosta riippumatta voidaan kuitenkin melko luotettavasti ennustaa, paljonko energiaa aurinkosähköjärjestelmäksi asennettu Wp tuottaa jonkin ajan yli.

Eteläisessä Suomessa 40 asteen kulmaan etelään suunnatun varjostamattomaan paikkaan asennetun aurinkosähköjärjestelmän voi odottaa tuottavan energiaa noin 800 – 900 kWh/kWp, mukaanlukien tuoton menetys talvella lumipeitteen vuoksi. Parhailla aurinkosähköalueilla, esimerkiksi keskisessä Espanjassa päästään noin puolitoistakertaisiin tuottoihin. Kun aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat parhaimmillaankin noin 15%, 1 kWp laitos vaatii vähintään noin seitsemän neliömetrin paneliston.

Ympäristön kannalta aurinkosähkö on lähes ideaalista; käytössä olevassa järjestelmässä ei ole liikkuvia eikä kuluvia osia, se ei vaadi mitään polttoainetta eikä tuota minkäänlaisia päästöjä tai meteliä. Kokonaiskuvan kannalta on myös todettava, että nykyisin paneliston ja aurinkosähköjärjestelmän valmistamisvaiheessa sitoma energia ja sen tuottamisen yhteydessä vapautunut hiilidioksidi saadaan säästettyä takaisin muutamassa käyttövuodessa jo Suomenkin olosuhteissa.

Aurinkokennojen ja komponenttien vuosikymmeniä jatkunut trendinomainen hintaerosio on johtanut siihen, että ns. verkkopariteetti suurella varmuudella saavutetaan lähivuosina. Verkkopariteetti tarkoittaa tilannetta, jossa aurinkosähköllä tuotettavan sähkön hinta (€/kWh) on yhtä suuri – tai pieni – kuin sähköverkosta ostettavan sähkön hinta. Tämä tilanne on jo ajoittain saavutettu aurinkoisilla alueilla, joilla sähkö on kallista.

Tuotto-odotusten ja aurinkosähköjärjestelmien markkinahintojen kautta on melko helppo laskea takaisinmaksuaika tai vaihtoehtoisesti kWh –hinta verkkoon kytketylle aurinkosähkölle. Käyttämällä 850 kWh/kWp tuottoa ja nykyisin realistista 5 €/Wp hintaa asennetulle järjestelmälle

sekä olettamalla 30 vuoden käyttöikä, 1% vuotuinen ylläpitokustannus (jolla katetaan myös mahdolliset vaihtovirtakomponenttien uusimiset) sekä 4% korkotaso, saadaan aurinkosähköjärjestelmällä tuotetun sähkön hinnaksi 0,40 €/kWh.

Hintojen jatkuva lasku on yhdessä tärkeimpien markkina-alueiden (esim. Saksa, Espanja, Ranska, Italia) takuuhinta- ym. tukijärjestelmien kanssa johtanut verkkoon kytkettyjen järjestelmien kysynnän voimakkaaseen kasvuun viime vuosina. Ympäristötietoisuuden lisääntyminen on synnyttänyt yksityishenkilöiden orastavaa kysyntää myös Suomessa – jopa tukijärjestelmistä riippumatta.

#### 4. Aurinkosähköjärjestelmän asentaminen rakennukseen

Aurinkosähkömarkkinoiden ollessa vasta kypsymässä, järjestelmät asennetaan useimmiten jo oleviin rakennuksiin, tai lisäkomponentteina rakennettavien rakennusten pintaan. Naps Systems on kehittänyt partnereidensa kanssa asennusmenetelmät sekä tasakatoille, eri katemateriaaleilla toteutetuille harjakatoille että seinille.

Tyypillisiä tämäntyyppisiä asennuksia ovat esimerkiksi kuvassa 1 esitetty Lielahden Citymarketin 39 kWp aurinkosähköjärjestelmä sekä kuvassa 2 esitetty pientaloasennus Saksassa.



Kuva 1. Lielahden Citymarketin 39 kWp aurinkosähköjärjestelmä, Naps Systems Oy.



Kuva 2. Naps Systemsin aurinkosähköjärjestelmä pientalon katolla Saksassa.

## 5. Rakennukseen integroitu aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmän integroiminen rakenteisiin on suoraviivainen ja ympäristöystävällinen tapa tuottaa sähköä rakennuksen omiin tarpeisiin ja mahdollisesti myyntiin. Aurinkosähköisen toiminnallisuuden sisältävät rakenteet tuottavat sähköä ja vähentävät ulkopuolelta ostettavan sähkön määrää, joten ne nopeuttavat koko rakennusinvestoinnin takaisinmaksua.

Koska aurinkopanelit ovat sellaisenaan vesitiiviitä ja kestävät ympäristöolosuhteita ja aikaa siinä missä muutkin kate- tai seinämateriaalit, niillä voidaan korvata muita rakennusmateriaaleja. Lasiin integroituja aurinkokennoja voi sellaisenaan käyttää lasisten ikkuna-, ulkoseinä- tai katelementtien tilalla, kun laminaatti suunnitellaan käyttäen kyseisten elementtien mittoja ja muita standardeja.

Aurinkokennoja on myös saatavilla eri väreissä, tiilenpunaisesta huopakatteen vihreään, vaalean sinertävästä mustaan, joten kehys- ja taustamateriaalit sopivasti valiten voidaan valmistaa eri väreissä lähes yksivärisiä seinäelementtejä, jotka sisältävät aurinkosähköisen toiminnallisuuden. Rakenteisiin integroidut järjestelmät mahdollistavat näin monipuoliset visuaaliset ja arkkitehtoniset ratkaisut. Käyttäjän tarpeista lähtien voidaan integroinnilla pyrkiä joko kätkemään järjestelmä tai tuomaan se tyylikkäästi ja trendikkäästi esiin.

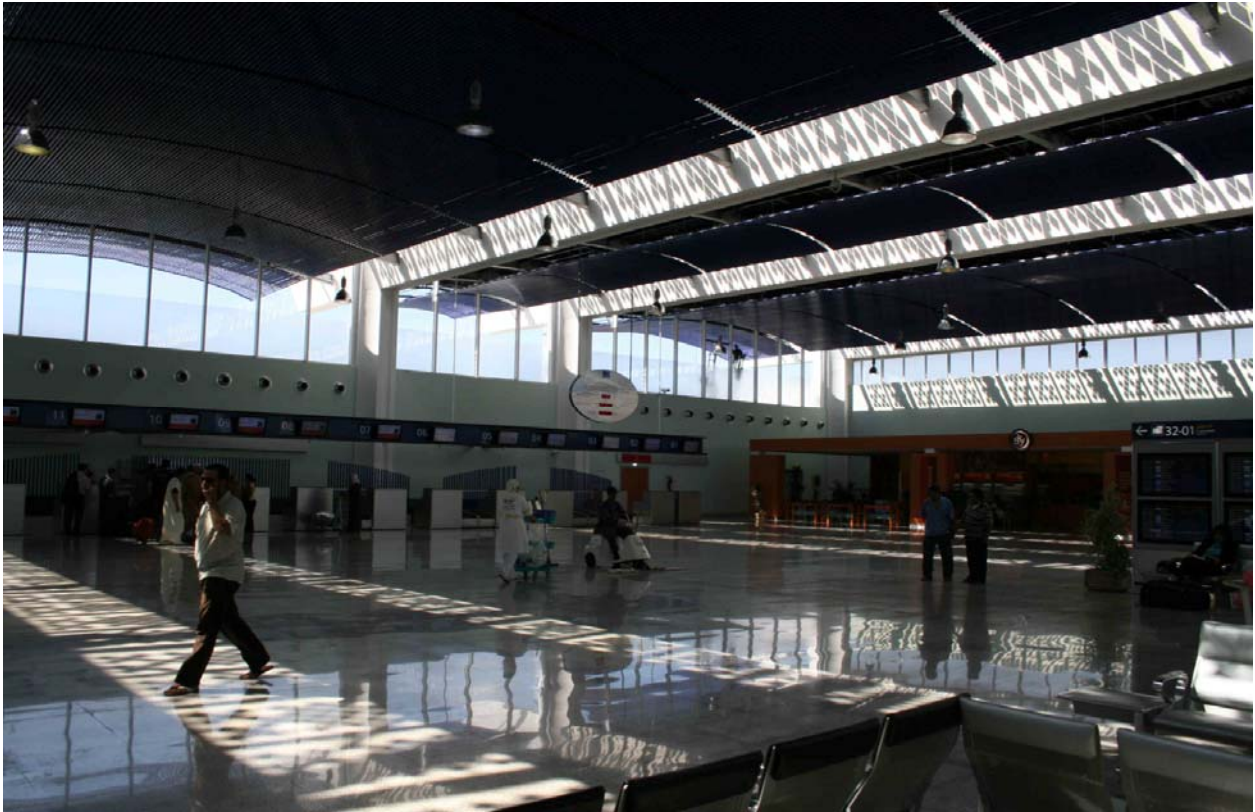
Kuvan 3 aurinkosähkötalo on rakennettu Viikkiin vuonna 2002. Aurinkokennot on integroitu lasielementteihin, jotka toimivat talon ulkoseinänä ikkunoiden välisellä alueella, jatkuen parvekekaiteina.





*Kuva 3. Naps Systemsin seinä- ja parveke-elementteihin integroitu aurinkosähköjärjestelmä asuinkerrostalossa Viikissä.*

Kuvissa 4 ja 5 esitetty Casablancan lentoaseman kattoikkunoihin integroitu aurinkosähköjärjestelmä on yksi esimerkki siitä millaisia visuaalisia efektejä integroidulla aurinkosähköjärjestelmällä voidaan saavuttaa.



*Kuva 4. Naps Systemsin kattoikkunoihin integroitu 72 kWp aurinkosähköjärjestelmä Casablancan lentoasemalla Marokossa.*



*Kuva 5. Yksityiskohta, Naps Systemsin kattoikkunaelementit Casablancan lentoasemalla Marokossa. Huomaa paikalliseen makuun sopiva sommittelu.*

## **6. Yhteenveto**

Aurinkosähkön tuotantolaitoksessa ei ole liikkuvia osia, se ei vaadi mitään polttoainetta eikä tuota minkäänlaisia päästöjä tai meteliä. Eteläisessä Suomessa aurinkosähkölaitoksen voi odottaa tuottavan noin 800 – 900 kWh sähköä kutakin asennettua kWp kohden. Aurinkosähkön hinta alittaa lähivuosina verkosta ostettavan sähkön hinnan joillakin alueilla. Suomessa aurinkosähkön hinnaksi muodostuu nyt noin 0,40 €/kWh.

Aurinkosähkölaitoksen toiminnallisuuden voi integroida suoraan rakennukseen jo rakennusvaiheessa. Tällainen integrointi vähentää ulkopuolelta ostettavan sähkön määrää, joten se nopeuttaa rakennusinvestoinnin takaisinmaksua. Koska aurinkopanelit ovat sellaisenaan vesitiiviitä ja kestäviä, niillä voidaan korvata muita rakennusmateriaaleja ja saada aikaan monipuolisia visuaalisia ratkaisuja.



# Energiatehokas ja kosteusteknisesti turvallinen kuivanapitolämmitys kesämökeissä

Jarkko Piironen ja Juha Vinha  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Tampereen teknillisellä yliopistolla on tutkittu uudentyyppistä lämmitysratkaisua ns. kuivanapitolämmitystä, joka soveltuu epäjatkuvässä käytössä oleviin vapaa-ajan asuntoihin sekä mahdollisesti myös erilaisiin talous- ja teollisuusrakennuksiin. Kuivanapitolämmitys perustuu siihen, että lämmitysenergiankulutusta minimoidaan lämmittäen asunnon sisäilmaa vain tarvittavassa määrin. Yksinkertainen malli kuivanapitolämmityksestä sallii asunnon sisälämpötilan laskea myös pakkasen puolelle. Lämmitystavan soveltuvuutta on tutkittu syksystä 2007 lähtien lisäeristämättömissä massiivihirsirakenteisissa vapaa-ajan asunnoissa suoritettujen kenttämittausten sekä ala- ja yläpohjarakenteilla tehtyjen laskentatarkastelujen avulla. Kenttämittausten perusteella lämmittämättömien vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet eivät näyttäisi olevan vielä nykyisessä ilmastossa sellaisia, että asuntojen lämmittäminen olisi välttämätöntä. Kuivanapitolämmitys parantaa tilannetta entisestään sekä asunnon sisäolosuhteiden että rakenteiden säilyvyyden osalta. Rakenteiden osalta asunnon lämmittäminen on suositeltavaa erityisesti heikosti tuulettuvien ryömintätilaisten alapohjien kohdalla. Jossain tapauksissa peruslämpö voidaan korvata kuivanapitolämmityksellä, jolloin lämmitysenergian kulutusta voidaan pienentää ilman että kosteusriskit kasvavat. Tämä edellyttää kuitenkin vesikalusteilta ja -laitteistoilta pakkasenkestävyyttä tai muita erillisjärjestelyjä.

## 1. Johdanto

Suomessa on jo lähes puoli miljoonaa vapaa-ajan asuntoa ja niiden määrä kasvaa edelleen. Vapaa-ajan asuntojen laatu- ja varustetaso kasvavat myös jatkuvasti. Nykyään jo lähes kaksi kolmasosaa vapaa-ajan asunnoista on sähköistettyjä ja monet näistä tehdään ns. kakkosasunnoiksi, jolloin niitä käytetään yhä enemmän myös syys-, talvi- ja kevätaikaan. Asunnon käyttömukavuuden parantamiseksi sekä asunnolla olevan kaluston ja irtaimiston säilyvyyden vuoksi, asuntoa pidetään yhä useammin lämmitettynä ajanjaksoina, jolloin se on käyttämättömänä. Vaihtoehtoisten lämmitysratkaisujen puuttuessa mökille valitaan yleensä peruslämmitys, vaikka rakenteiden, kalusteiden ja irtaimiston säilyvyys voitaisiin monissa tapauksissa varmistaa huomattavasti vähäisemmällä lämmittämisellä ja peruslämpöön nähden merkittävästi pienemmällä energiakulutuksella. Eräs peruslämpöä ekotehokkaampi lämmitystapa on ns. kuivanapitolämmitys, jonka soveltuvuutta vapaa-ajan asuntoihin on tutkittu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella viimeisten kahden vuoden aikana.

Kuivanapitolämmitykseen keskittyvä projekti ”Ekotehokas rakennusten epäjatkuva lämmitys” on yksi osaprojekti Ympäristöklusterin ”Vapaa-ajan asumisen ekotehokkuus” tutkimushankkeessa. Tämä ympäristöklusterin tutkimushanke tarkastelee vapaa-ajan asumista kestävästä kulutuksesta ja ekotehokkuuden kannalta pyrkien löytämään ja kehittämään vaihtoehtoisia teknologioita, palveluja ja käytäntöjä, jotka mahdollistavat mökkeilyn ekotehokkuuden parantamisen. Tällä hetkellä vapaa-ajan asuntojen vuosittainen sähkönkulutus on tilastojen mukaan noin 500 GWh ja

sen on arvioitu kasvavan jopa 1000 GWh:in, mikä edustaisi noin 10 %:a sekä sähkölämmityksen että kotitaloussähkön kokonaismäärästä, eli ekotehokkuuden parantamiselle löytyy potentiaalia.

## 2. Kuivanapitolämmitys ja sen toiminta

### 2.1 Vapaa-ajan asunnoissa tavoiteltavat sisäolosuhteet

Sisäilman suhteellinen kosteus vaikuttaa lämpötilan ohella oleellisesti rakenne-, kaluste- ja irtaimistomateriaalien ominaisuuksiin, säilymiseen ja käyttäytymiseen sekä sisäilman laatuun. Liian alhainen suhteellinen kosteus lisää mm. pölyämistä sekä limakalvojen ja ihon oireilua. Liian korkea suhteellinen kosteus lisää puolestaan hygieniariskejä, pölypunkkien määrää, haitallisten hiukkasten irtoamista materiaaleista, värivikojen ja muodonmuutoksien esiintymistä materiaaleissa, metallien korroosion nopeutumista sekä home- ja lahosienien esiintymistä. Suhteellinen kosteus vaikuttaa myös rakenteiden toimintaan siten, että esim. lämmöneristemateriaalien kohdalla suhteellisen kosteuden kohoaminen lisää materiaalin lämmönjohtavuutta, jolloin koko rakenteen lämmöneristyskyky heikkenee.

Vapaa-ajan asuntojen kohdalla puupohjaisten materiaalien homehtuminen on merkittävin turmeltumisilmiö. Mikäli puupohjaisissa materiaaleissa ei esiinny homea, sisäpinnat ja irtaimisto eivät yleensä turmellu muillakaan tavoin. Poikkeuksen tekevät ainoastaan korroosioherkät metallit, jotka voivat alkaa ruostua jo 60 % RH:ssa. Yleisesti voidaan todeta, että homeenkasvua ei esiinny alle 0 °C:n lämpötiloissa tai suhteellisen kosteuden ollessa alle 80 % RH [1, 2]. Vapaa-ajan asunnoissa sisäilman suhteellisen kosteuden tavoiteltava taso voisi olla keskimäärin 70 % RH pysyen hetkittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta kuitenkin alle 80 % RH:n, kun asunto ei ole käytössä. Tällöin olosuhteet olisivat hyväksyttävällä tasolla myös ikkunapinnoilla, joilla suhteelliset kosteudet voivat olla ajoittain jopa 10...15 % RH korkeammat kuin sisäilmassa johtuen sisäilmaan nähden nopeammasta lämpötilan laskemisesta ulkoilman kylmetessä.

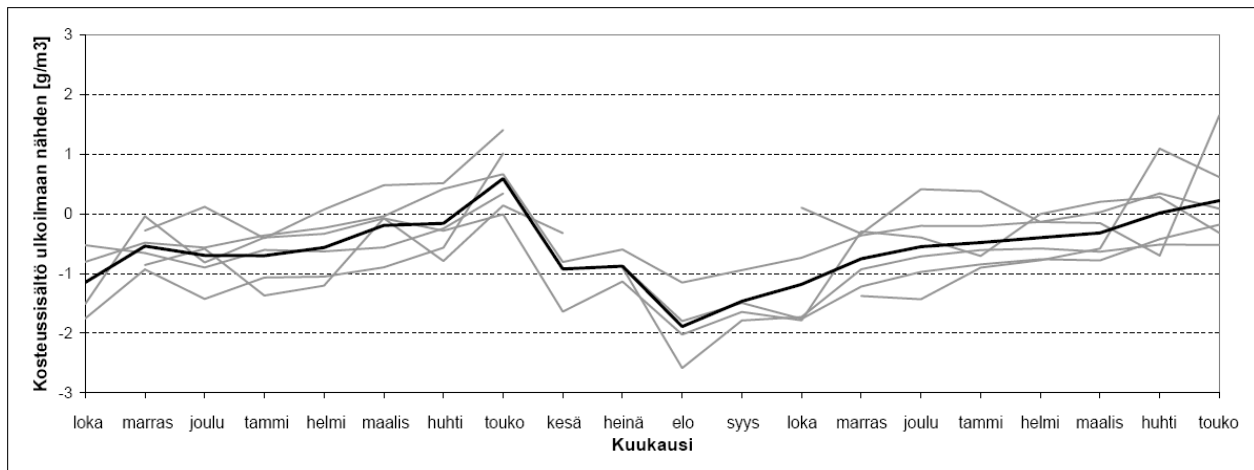
Sisäilman suhteellisen kosteuden rajoittaminen maksimissaan 80 % RH:een ei kuitenkaan takaa, että rakennuksen sisätilojen kriittisimpiin kohtiin, kuten ikkunapinnoille, ei missään tilanteissa tiivistyisi kosteutta. Esimerkiksi talviaikaisten vierailujen yhteydessä sisäilmaan tulee lisäkosteutta vedenkäytöstä (ruuanlaitto, tiskaus, peseytyminen, ym.) sekä puurakenteista niiden luovuttaessa kosteutta lämmitessään, mikä kasvattaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta. Tilannetta kuvataan usein siten, että lämmittämisen yhteydessä mökki alkaa ns. hikoilla. Vaikka sisäilman vesihöyrypitoisuus kasvaa, niin lämmittäminen kasvattaa myös ilman kyllästyskosteuspitoisuutta, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus laskee. Ikkunapinnat lämpenevät kuitenkin sisäilmaa hitaammin, jolloin niiden läheisyydessä ilman kyllästyskosteuspitoisuus pysyy alhaisempana. Ikkunapintojen läheisyydessä ilmaan ei siis mahdu yhtä paljon vesihöyryä, jolloin ylimääräinen kosteus tiivistyy vedeksi lasin sisäpintaan. Ikkunoiden lisäksi kosteutta voi tiivistyä samalla tavoin myös muihin vastaavanlaisiin kylmiin pintoihin.

### 2.2 Sisäolosuhteisiin vaikuttavat ilmiöt ja kuivanapitolämmityksen toimintaperiaate

Käyttämättöminä olevien vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet riippuvat ulkoilman lämpötila- ja kosteusolosuhteista, lämmityksestä, vaipan lämmöneristyskyvystä, ilmanvaihtuvuudesta sekä sisäilmaan yhteydessä olevista materiaaleista. Lämmittämättömissä vapaa-ajan asunnoissa sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa lyhyellä viiveellä. Sisäilman lämpötilamuutokset ovat hitaampia kuin ulkoilmassa, jolloin sisälämpötilan vaihteluväli on vuorokausitasolla pienempi.

Sisäilman vesihöyrypitoisuus seuraa vastaavalla tavalla ulkoilman vesihöyrypitoisuutta. Sisälämpötilassa tapahtuvat muutokset ovat sitä pienempiä, mitä paremmin rakennusvaippa eristää lämpöä. Myös ilmanvaihtuvuus, joka muodostuu tarkoituksellisesti järjestetystä ilmanvaihdosta ja vuotoilmanvaihdosta, vaikuttaa oleellisesti sisäolosuhteissa tapahtuviin muutoksiin. Mitä suurempi on rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välinen ilmanvaihtuvuus, sitä suuremmat ovat sisälämpötilassa ja sisäilman vesihöyrypitoisuudessa tapahtuvat muutokset. Kuivanapitolämmityksissä vapaa-ajan asunnoissa sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa kuten lämmittämättömissä asunnoissa, mutta sisälämpötila on kuitenkin lämmityksellä aikaansaadun lämpötilaeron verran suurempi kuin mitä se olisi ilman lämmitystä.

Lämmityksissä jatkuvassa asuinkäytössä olevissa rakennuksissa sisäilma sisältää tavallisesti enemmän vesihöyryä kuin ulkoilma johtuen asumisen kosteustuotosta ja koska rakennuksen lämpimämpi sisäilma voi sitoa kylmään ulkoilmaan nähden enemmän kosteutta. Vapaa-ajan asunnoissa tilanne on vesihöyrypitoisuuksien suhteen varsin erilainen, sillä näissä asunnoissa asumisen kosteustuotto on huomattavasti vähäisempää mm. epäjatkuvan käytön johdosta. Kenttämittauksissa mukana olleiden koekohteiden kuukausittaiset kosteussisällöt on esitetty kuvassa 1.

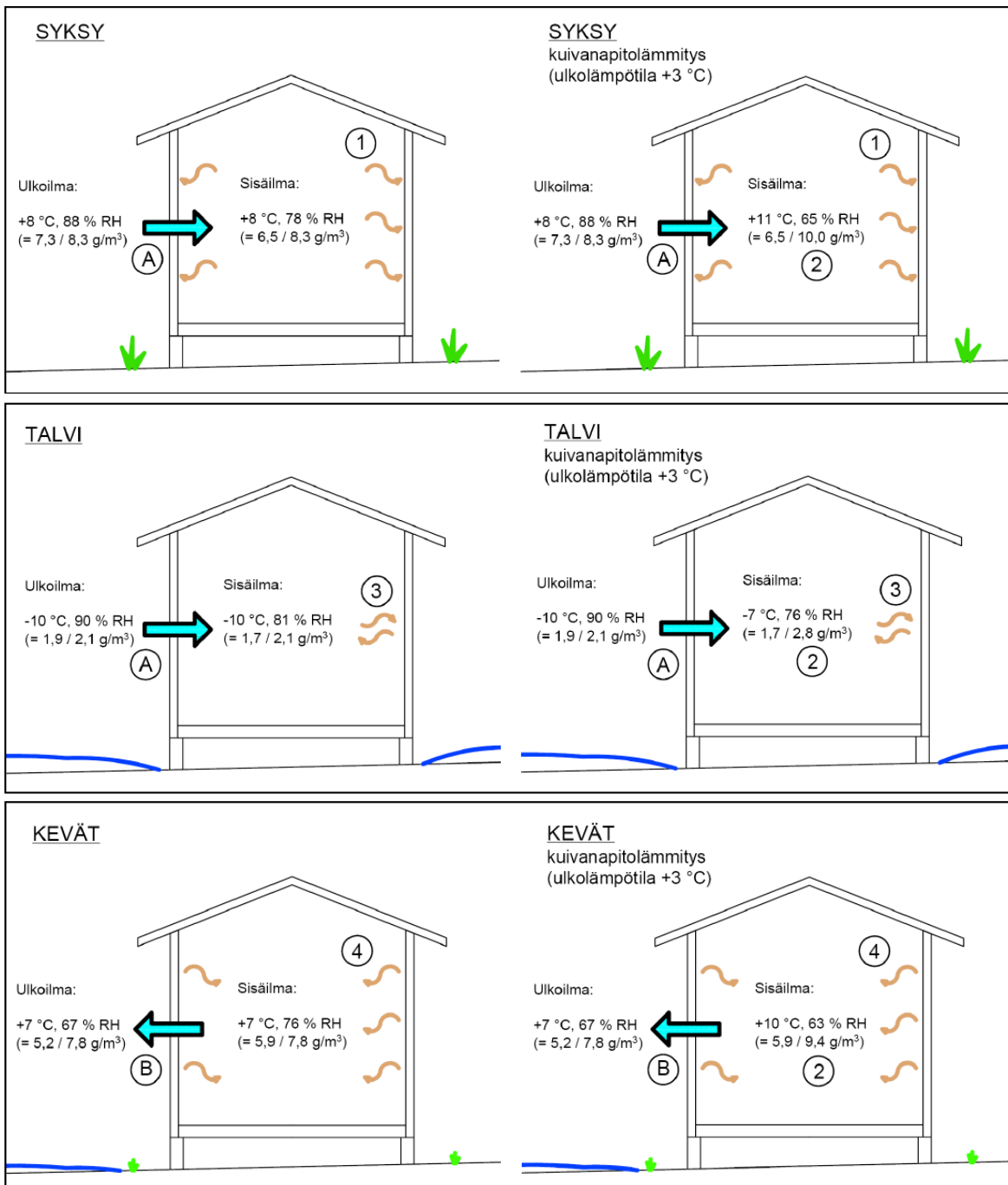


Kuva 1. Koekohteiden kosteussisällöt vuosina 2007–2009. Käyrät kuvaavat eri koekohteiden kuukausikeskiarvoja, joiden keskiarvokäyrä on esitetty mustalla värillä. Pystyakselin kosteussisältö kuvaa sisäilman ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien välistä erotusta.

Kuvasta 1 havaitaan, että vapaa-ajan asuntojen sisäilmassa on yleensä vähemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa. Tällöin vesihöyry alkaa kulkeutua diffuusiolla ulkoilmasta sisäilmaan. Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden ollessa suurempi myös ilmanvaihtuvuus sisä- ja ulkoilman välillä nostaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta, sillä korvausilma sisältää enemmän vesihöyryä kuin poistoilma.

Kuivanapitolämmitys toimii siten, että lämmityksellä pidetään sisäilman lämpötila muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeammalla. Kovilla pakkasilla kuivanapitolämmitys sallii sisälämpötilan laskea myös pakkasen puolelle. Kuvassa 2 on esitetty pääperiaatteet siitä, miten kuivanapitolämmitys vaikuttaa vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteisiin eri vuodenaikoina. Kuvassa on esitetty myös sisäilman vesihöyrypitoisuuteen vaikuttavia ilmiöitä sekä kosteuden kulkeutuminen eri tilanteissa. Kosteuden kulkeutuminen on kuvattu kosteuden nettovirtana, mikä tarkoittaa, että kosteutta siirtyy enemmän esitettyyn suuntaan kuin vastakkaiseen suuntaan. Kosteuden nettovirta sisältää sekä ilmanvaihdon kautta kulkeutuvan osuuden (konvektion) että rakenteiden läpi kulkeutuvan osuuden (diffuusion) eli nettovirta on em. tekijöiden yhteisvaikutus.

Kuvassa on esitetty myös kosteuden siirtyminen sisäilmasta hirsiseiniin ja päinvastoin, sillä nämä ilmiöt voivat vaikuttaa merkittävästi sisäilman vesihöyrypitoisuuteen.



**A** Kosteuden nettovirta on ulkoa sisäänpäin sisäilman vesihöyrypitoisuuden ollessa pienempi kuin ulkoilmassa (esim. syksy: 6,5 g/m<sup>3</sup> < 7,3 g/m<sup>3</sup>).

**B** Kosteuden nettovirta on sisältä ulospäin sisäilman vesihöyrypitoisuuden ollessa suurempi kuin ulkoilmassa (kevät: 5,9 g/m<sup>3</sup> > 5,2 g/m<sup>3</sup>).

1 Hirsien sisäpinnat sitovat sisäilman kosteutta, mikä pienentää sisäilman vesihöyrypitoisuutta.

2 Lämmitys kasvattaa sisäilman kyllästyskosteuspitoisuutta (esim. syksy: 8,3 g/m<sup>3</sup>:stä 10,0 g/m<sup>3</sup>:aan), jolloin sisäilman suhteellinen kosteus pienenee. Lämmityksellä on samanlainen vaikutus kaikkina vuodenaikoina.

3 Hirret sitovat tai luovuttavat kosteutta riippuen olosuhteista.

4 Hirsien sisäpinnat luovuttavat sitomaansa kosteutta sisäilmaan, mikä kasvattaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta.

Kuva 2. Kuivanapitolämmityksen toiminta vapaa-ajan asunnoissa eri vuodenaikoina. Kuvassa on esitetty tyypilliset sisä- ja ulkoilman lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet. Suhteellisen kosteuden määräytyminen on esitetty lukuarvon jälkeisessä sulkulausekkeessa.



Vapaa-ajan asunnon lämmittäminen nostaa sisäilman kyllästyskosteuspitoisuutta, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus (eli vesihöyrypitoisuuden ja kyllästyskosteuspitoisuuden välinen suhde) laskee. Lämmittäminen ei vaikuta suoraan sisäilman vesihöyrypitoisuuteen. Välillisiä vaikutuksia, jotka voivat vaikuttaa sisäilman vesihöyrypitoisuuteen, ovat mm. ilmanvaihdon tehostuminen sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron kasvaessa sekä sisäilmaan yhteydessä olevien materiaalien kosteudensitomiskyvyssä tapahtuvat muutokset. Käytön aikana, kuten mökkikäynnin yhteydessä, vesihöyrypitoisuuteen vaikuttaa lämmittämisen aikaansaamien ilmiöiden lisäksi myös asumisen kosteustuotto.

Kuvasta 2 havaitaan, että kuivanapitolämmityksellä on suurempi vaikutus sisäilman suhteelliseen kosteuteen syksyisin ja keväisin, jolloin lämmitys nostaa ilman kyllästyskosteuspitoisuutta enemmän. Syksyisin ja keväisin lämmittämättömän mökin sisäilman olosuhteet ovat homeen kasvun kannalta lähellä kriittistä tasoa, mutta yleensä kuitenkin vielä hyväksyttävät. Talvella pakkaneen estää homeen kasvun, vaikka sisäilman suhteellinen kosteus olisikin korkealla. Mikäli kuvassa 2 esitetyissä syysolosuhteissa olisi +8 °C:n peruslämpöön säädetty mökki, lämmitys ei olisi vielä päällä ja mökin sisäolosuhteet olisivat vastaavanlaiset kuin lämmittämättömässä mökissä. Myös keväällä tilanne voisi olla vastaava. Kuivanapitolämmityksen voidaan siis todeta olevan kevät- ja syysolosuhteissa peruslämpöä suotuisampi lämmitystapa.

Sisäilmaan yhteydessä olevat materiaalit vaikuttavat osaltaan sisätilojen lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin (ks. kuva 2), sillä ne kykenevät sitomaan itseensä sekä lämpöä että kosteutta. Lämmönsitomiskykyä vuoksi sisäilmaan yhteydessä olevat materiaalit hidastavat sisälämpötilan muutoksia: kun lämpötila kohoaa, materiaali sitoo lämpöä ja kun lämpötila laskee, materiaali luovuttaa sitomaansa lämpöä. Materiaalit käyttäytyvät samoin myös kosteuden osalta: kun suhteellinen kosteus kasvaa, materiaali sitoo kosteutta sisäilmasta ja kun suhteellinen kosteus laskee, materiaali luovuttaa sitomaansa kosteutta sisäilmaan. Materiaalin kosteudensitomiskyky riippuu voimakkaasti materiaalin hygroskooppisuudesta, lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Mitä hygroskooppisempi materiaali on, sitä enemmän se voi sitoa itseensä kosteutta. Yleensä materiaali kykenee sitomaan enemmän kosteutta, kun lämpötila laskee tai kun suhteellinen kosteus on korkea. Vapaa-ajan asunnoissa esim. puu ja puupohjaiset materiaalit sekä tekstiilit voivat sitoa lämpöä ja kosteutta merkittävässä määrin.

Talviaikaiset vierailut kuivattavat vapaa-ajan asuntoa erityisesti materiaalien kosteussitomiskyvyssä tapahtuvien muutosten johdosta. Mökin lämpeneminen ja sitä seuraava suhteellisen kosteuden laskeminen vaikuttavat yhdessä niin, että hirret eivät kykene enää sitomaan yhtä paljon kosteutta, jolloin ne alkavat kuivua haihduttaen osan kosteudestaan sisäilmaan. Hirsien kuivumisesta ja asumisesta aiheutuva vesihöyrypitoisuuden kasvu kompensoituu pääosin sillä, että ilmanvaihdon kautta kosteaa sisäilmaa poistuu ja tilalle virtaa kuivaa ulkoilmaa. Asunnolta poistuttua sisälämpötila alkaa laskea ja suhteellinen kosteus kohota, jolloin vierailun aikana kuivuneet hirsipinnat kykenevät sitomaan jälleen itseensä enemmän kosteutta. Sisäilman kosteutta alkaa siirtyä hirsisiin, minkä johdosta sisäilman suhteellinen kosteus voi pysyä normaalia tasoa alhaisempana vuorokausien tai jopa viikkojen ajan.

### 3. Kenttämittaukset

#### 3.1 Kenttämittausten tavoitteet ja suoritus

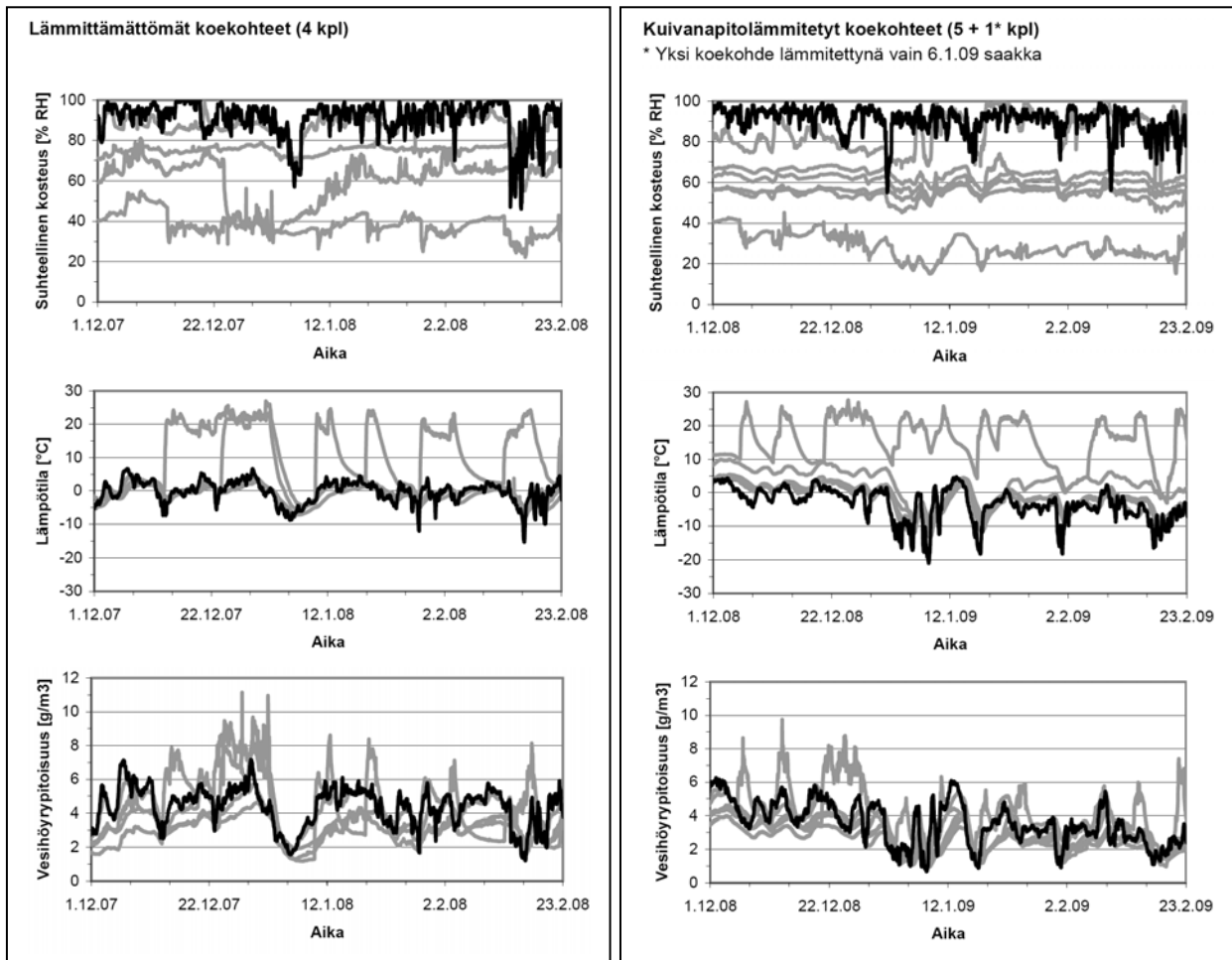
Projektin päätavoitteina oli hankkia tietoa sekä lämmittämättömien että lämmitettyjen vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteista sekä laatia tietojen pohjalta ohjeistus kuivanapitolämmityksen tehonsäätöön. Lämmitystehon ohjeistuksella pyritään saavuttamaan energiasäästöä vapaa-ajan asuntojen ylläpitolämmityksessä sekä pienentämään asuntojen homehtumis- ja turmeltumisriskejä. Lämmitystehon ohjeistus, jossa otetaan huomioon erilaiset lämmitystehon suuruuteen vaikuttavat tekijät, esitetään myöhemmin ilmestyvässä TTY:n julkaisussa ”Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan” [3]. Lämmitystehon suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. rakennuksen ilmanvaihto, rakennuksen vaipan lämmöneristävyys ja ilmatiiviys sekä rakennuksen mittasuhteet.

Kenttämittausten koekohteina oli seitsemän Tampereen läheisyydessä sijaitsevaa lisäeristämätöntä massiivihirsirakenteista mökkiä. Mittaukset muodostuivat koekohteiden ilmatiiveyksien mittaamisesta sekä koekohteissa suoritetuista lämpötila- ja kosteusmittauksista. Koekohteista viidessä suoritettiin lämpötila- ja kosteusmittauksia kahden talven yli vuosina 2007–2009 ja kahdessa koekohteessa ainoastaan joko talvena 2007–2008 tai talvena 2008–2009. Kenttämittausten lisäksi koekohteista kerättiin tietoja asuntojen omistajille laadituilla kyselyillä ja havainnoinnin avulla kohdekäyntien yhteydessä. Kenttämittausten ensimmäisenä talvena 2007–2008 mukana olleista kuudesta koekohteesta neljä oli talven yli lämmittämättöminä, yhtä pidettiin peruslämmöllä n. 9 °C:ssa ja yhtä kuivanapitolämmityksellä (vakiotehoinen lämmitys), siten että sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero oli jatkuvasti noin 3 °C. Toisena talvena 2008–2009 kaikissa kuudessa koekohteessa oli käytössä vakiotehoinen kuivanapitolämmitys joko koko mittausjakson ajan tai siten, että koekohde oli osan ajasta lämmittämättömänä.

#### 3.2 Kenttämittaustulokset

Koska kenttämittauksia tehtiin ainoastaan lisäeristämättömissä massiivihirsirakenteisissa vapaa-ajan asunnoissa, ei tuloksia voida soveltaa esim. kerroksellisiin puurankarakenteisiin tai lisäeristettyihin massiivihirsirakenteisiin vapaa-ajan asuntoihin. Yksi syy tähän on se, että massiivihirsirakenteet kykenevät sitomaan itseensä enemmän sekä lämpöä että kosteutta, mikä voi vaikuttaa asunnon sisäolosuhteisiin merkittävästi.

Kuvassa 3 on esitetty lämpötila- ja kosteusmittauksissa saatuja tuloksia lämmittämättömissä ja lämmitetyissä koekohteissa. Kuvaa tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon, että lämmittämättömien ja lämmitettyjen koekohteiden olosuhteet on mitattu eri vuosina. Kuvassa esitetyt sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet on mitattu keskeltä rakennuksen sisätilaa.



Kuva 3. Koekohteiden sisäilmaolosuhteet sekä ulkoilmaolosuhteet Ilmatieteen laitoksen Tampereen sääasemalta (kuvassa mustalla). Vasemmalla on esitetty lämmittämättömät koekohteet ajanjaksolta 1.12.07–23.2.08 ja oikealla kuivanapitolämmitetyt koekohteet ajanjaksolta 1.12.08–23.2.09. Yksi koekohde oli lämmitettynä vain 6.1.2009 saakka. Yläkuvaajissa on suhteelliset kosteudet, keskellä lämpötilat ja alhaalla vesihöyrypitoisuudet.

### 3.3 Mittaustuloksista tehdyt havainnot

Alla on lueteltu kenttämittaustulosten perusteella tehtyjä havaintoja erikseen lämmittämättömissä ja lämmitetyissä koekohteissa (ks. kuva 3).

Lämmittämättömien vapaa-ajan asuntojen mittaustuloksista tehtiin seuraavia havaintoja:

- Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet eivät ole yleensä kriittisiä homeen kasvun kannalta, mutta jossain tapauksissa ne voivat olla kriittisen tason tuntumassa.
- Sisäilman suhteellinen kosteus pysyy pääsääntöisesti alle 80 % RH:n, mutta ikkunapinnoilla suhteellinen kosteus voi olla ajoittain jopa 10–15 % RH korkeampi kuin sisäilmassa. Näin ollen kosteuden tiivistymisen kannalta kriittisimmät kohdat ovat ikkunapinnat. Tiivistymistä ei kuitenkaan yleensä tapahdu asunnon ollessa käyttämättömänä.
- Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet määräytyvät pääosin ulkoilmaolosuhteiden mukaan siten, että sekä sisäilman lämpötila että sisäilman vesihöyrypitoisuus seuraavat ulkoilmassa tapahtuvia muutoksia lyhyellä, vain muutaman tunnin viiveellä. Olosuhteisiin vaikuttaa myös sisäilmaan yhteydessä olevat materiaalit.

- Sisäilman lämpötilan ja vesihöyrypitoisuuden muutosnopeuteen vaikuttaa merkittävästi vaipan lämmöneristyskyky sekä ilmanvaihtuvuus rakennuksen sisä- ja ulkoilman välillä.
- Lukuun ottamatta kevättä ja ajankohtia, jolloin asunto on käytössä, sisäilman vesihöyrypitoisuus on pääsääntöisesti pienempi kuin ulkoilman vesihöyrypitoisuus. Keväällä tilanne voi olla päinvastainen. Ilmiöön vaikuttaa mm. sisäilmaan yhteydessä olevien hirsipintojen kosteudensitomiskyky.
- Talviaikaiset käynnit kuivattavat mökkiä. Kuivumisvaikutus on sitä merkittävämpi, mitä enemmän asunnossa käydään ja mitä pidempään vierailut kestävät.

Kuivanapitolämmitettyjen vapaa-ajan asuntojen mittaustuloksista tehtiin seuraavia havaintoja:

- Kuivanapitolämmitys antaa lisävarmuutta pienentäen homehtumisriskiä. Vaikutus voi olla hyvinkin merkittävä asunnossa, jossa sisäolosuhteet olisivat muuten homeen kasvun kannalta lähellä kriittistä tasoa.
- Sisä- ja ulkoilman välille tavoitellun lämpötilaeron ollessa +3 °C sisäilman suhteellista kosteutta saadaan laskettua karkeasti noin 10 % RH. Tavoitelämpötilaeron kasvaessa suhteellinen kosteus pienenee entisestään. Lämmityksellä on kuitenkin vähäisempi vaikutus ikkunapintojen olosuhteisiin kuin sisäilman olosuhteisiin.
- Siirryttäessä peruslämmöstä kuivanapitolämmitykseen vapaa-ajan asunnon sisäolosuhteet eivät muutu oleellisesti. Kuivanapitolämmitys voi jopa parantaa tilannetta syys- ja kevätaikaan.
- Ulkoilman olosuhteet vaikuttavat sisäilman olosuhteisiin samoin kuin lämmittämättömissä vapaa-ajan asunnoissa. Lämmityksen johdosta sisälämpötila pysyy kuitenkin muutaman asteen korkeammalla kuin mitä se olisi ilman lämmitystä.
- Lämmittäminen ei vaikuta sisäilman vesihöyrypitoisuuteen, joten tilanne on sisä- ja ulkoilman välisen vesihöyrypitoisuuseron kannalta vastaavanlainen kuin lämmittämättömissä vapaa-ajan asunnoissa.
- Lämmittämiseen ei ole tarvetta ilmanpitävyydeltään tiiviissä vapaa-ajan asunnossa, joka on lähes jatkuvassa asuinkäytössä. Tällaisessa asunnossa sisäilman suhteellinen kosteus voi lämmittämisen seurauksena laskea jopa haitallisen alhaiseksi.
- Ilmanvaihtuvuuden rajoittamisella, kuten ilmanvaihdon sulkemisella, voidaan tarvittavaa lämmitystehoa pienentää. Lämmitystehoa voidaan pienentää sitä enemmän, mitä tiiviimpi on rakennuksen vaippa. Tiiviissä asunnossa ilmanvaihdon sulkemisella ei havaittu olevan haitallista vaikutusta edes kevätaikaan.

#### 4. Laskentatarkastelut

Koska massiivihirsirakenteisissa asunnoissa on myös kerroksellisia vaipparakenteita ylä- ja alapohjissa ja koska näiden rakenteiden toimintaa haluttiin arvioida jollain tasolla, tutkimuksessa tehtiin useita laskentatarkasteluja sekä tuuletetuille yläpohjarakenteille että ryömintätilallisille alapohjarakenteille. Rakenteissa käytettiin vesihöyrynläpäisevyydeltään toisistaan poikkeavia ilman-/ höyrynsulkukerroksia ja hygroskooppisuudeltaan erilaisia lämmöneristysmateriaaleja. Laskentatarkasteluissa, jotka esitetään yksityiskohtaisemmin TTY:n julkaisussa [3], sovellettiin tuuletusraoillille ulkoseinärakenteille kehitettyä suunnittelumenetelmää [4] sekä ryömintätilaisten alapohjarakenteiden osalta saatuja tutkimustuloksia [5].

Laskentatarkastelujen perusteella vapaa-ajan asunnon alapohjarakenne määrää asunnon lämmitystarpeen suuruuden. Yläpohjan, maanvastaisella lämmöneristetyllä betonilaatalla toteutetun alapohjan sekä hyvin tuulettuvan ryömintätilaisen (esim. pilariperusteisen) alapohjan toimivuus ei edellytä asunnon lämmittämistä vielä nykyisissä ilmasto-olosuhteissa riippumatta

siitä, millaista höyrynsulkumateriaalia näissä rakenteissa on käytetty. Asunnon lämmittäminen, esim. ylläpitämällä 3 °C:n lämpötilaeroa, parantaa tosin rakenteiden toimivuutta. Alapohjan kohdalla hyvä tuulettavuus edellyttää, ettei ryömintätilan ilmanvaihtoa ole heikennetty esim. varastoimalla ryömintätilaan polttopuita ja että ryömintätila ei ole monttu, johon vesi jää makaamaan. Lisäksi ryömintätilan maapohjan olisi suositeltavaa olla lämpöeristetty. Tässä yhteydessä on kuitenkin huomattava, että laskentatarkasteluja tehtiin ainoastaan tyypillisimmille avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyille ylä- ja alapohjarakenteille.

Heikosti tuulettuvan ryömintätilan olosuhteet voivat olla maaperän vaikutuksen sekä vähäisen ilmanvaihtuvuuden vuoksi erittäin kriittisiä. Heikosti tuulettuvissa ryömintätalaisissa (esim. yhtenäisellä perusmuurilla toteutetuissa) alapohjissa suositellaan käytettävän kohtalaisen läpäiseviä höyrynsulkumateriaaleja, jotta alapohjan läpi sisäänpäin diffuusiolla siirtyvä kosteus ei kertyisi rakenteessa olevan höyrynsulun pinnalle. Höyrynsulun ollessa riittävän läpäisevä (esim. bitumipaperi), rakenteen toimivuus ei edellytä asunnon lämmittämistä. Sen sijaan, jos rakenteessa on käytetty tiiviimpää höyrynsulkua (esim. muovitiivistyspaperia tai muovikalvoa) asuntoa tulee lämmittää siten, että sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on n. 5 °C varsinkin syksyllä ja keväällä.

## 5. Yhteenveto

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kenttämittaukset koskevat ainoastaan lisäeristämättömiä massiivihirsirakenteisia vapaa-ajan asuntoja. Tuloksia ei siten voida täysin soveltaa esim. puurankarakenteisiin tai sisäpuolelta lisäeristettyihin hirsirakenteisiin vapaa-ajan asuntoihin, koska näissä tapauksissa seinien sisäpinnan kosteudensitomiskyky voi poiketa merkittävästi lisäeristämättömistä hirsirakenteista. Puurankarakenteiset seinät ja sisäpuolelta lisäeristetyt hirsiseinät ovat lisäksi kerroksellisia rakenteita, joiden kosteustekninen toiminta on massiivihirsiseiniin nähden erilainen. Toisaalta tehtyjen ylä- ja alapohjalaskelmien perusteella näyttäisi siltä, että 3 °C:n lämpötilaero olisi yleensä riittävä myös näissä tapauksissa.

Tulosten perusteella asunnon alapohjarakenteen toiminta määrää asunnon lämmitystarpeen ja tarvittavan lämmitystehon suuruuden. Lämmittämättömien massiivihirsirakenteisten vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteet eivät näytä olevan nykyisessä ilmastossa sellaisia, että lämmittäminen olisi välttämätöntä. Toisaalta mikäli asunnossa on heikosti tuulettuva ryömintätilainen alapohja, rakenteen toiminta edellyttää asunnon lämmittämistä jopa siten, että sisä- ja ulkoilman välillä ylläpidetään n. 5 °C:n lämpötilaeroa. Sen lisäksi, että kuivanapitolämmitys parantaa tilannetta sisäilmaolosuhteiden ja rakenteiden osalta, se myös lisää asunnon käyttömukavuutta vähentäen mökin irtaimiston kosteusmuodonmuutoksia ja pitäen tekstiilit ja vuodevaatteet kuivempina.

Peruslämpö kannattaa muuttaa kuivanapitolämmitykseksi, mikäli mökillä olevat kodinkoneet sekä vesikalusteet ja -laitteistot sen sallivat. Vesikalusteiden ja -laitteistojen osalta on tärkeää, että niissä oleva vesi voidaan poistaa, ettei veden jäätyminen aiheuta vesivahinkoja.

Vesikalusteisiin on myös mahdollista asentaa erillinen lämmitys tai modifioida kuivanapitolämmitystä niin, että asunnon sisälämpötila ei laske pakkasen puolelle. Asunnon sisäolosuhteet voidaan pitää riittävän turvallisina myös kuivanapitolämmityksen avulla. Kuivanapitolämmitys on kosteusteknisesti jopa peruslämpöä parempi vaihtoehto, koska tällä menetelmällä mökkiä lämmitetään myös syys- ja kevätaikaan, jolloin riski homeen kasvulle on suurin.

Kuivanapitolämmityksellä sisä- ja ulkoilman välillä pidettävä 3–5 °C:n lämpötilaero on riittävä. Siihen, kuinka suurella lämmitysteholla tavoitelämpötilaero saavutetaan, vaikuttavat monet eri

tekijät, joita käsitellään myöhemmin ilmestyyvässä TTY:n julkaisussa [3]. Vapaa-ajan asunnon lämmitysenergian kulutusta voidaan pienentää entisestään sulkemalla ilmanvaihto ajaksi, jolloin asunto on käyttämättömänä. Massiivihirsirakenteisissa mökeissä ilmanvaihdon sulkeminen vaikuttaa suotuisasti myös sisäilman kosteusolosuhteisiin loppukesällä ja syksyllä, sillä sisäilmassa on silloin pääsääntöisesti vähemmän kosteutta kuin ulkoilmassa. Tämä johtuu siitä, että hirret sitovat sisäilmasta kosteutta itseensä. Ilmanvaihdon tulisi olla kuitenkin avoimna vierailujen yhteydessä sekä kevät aikaan, jolloin sisäilman vesihöyrypitoisuus on yleensä suurempi kuin ulkoilmassa. Ilmanvaihto olisi syytä pitää avoimna esim. huhtikuun alusta kesän viimeiseen vierailuun saakka.

Jotta kuivanapitolämmitys voidaan ottaa tehokkaasti käyttöön koko mökkikannassa, tarvitaan tutkimusta hirsirakenteisten vapaa-ajan asuntojen lisäksi myös ulkoseinärakenteiltaan erilaisten asuntojen sisäolosuhteista ja kuivanapitolämmityksen soveltuvuudesta tällaisiin kohteisiin. Potentiaalisia tutkimuskohteita ovat mm. vapaa-ajan asunnot, joiden ulkoseinät ovat puurankarunkoisia ja toteutettu erityyppisillä lämmöneristeillä. Jotta lämmityksen toiminnasta ja sen riskittömyydestä saataisiin luotettavampi käsitys, tulisi kenttämittausten avulla selvittää myös ala- ja yläpohjan todellisia lämpötila- ja kosteusolosuhteita. Tutkimusta tarvitaan erityisesti yhtenäisellä perusmuurilla toteutettujen ryömintätilaisten alapohjien osalta. Selvitystä vaatii myös se, miten mahdollinen ilmastonmuutos tulisi vaikuttamaan vapaa-ajan asuntojen sisäolosuhteisiin ja rakenteiden säilymiseen.

Lisätutkimusta tarvitaan myös ilmanvaihdon merkityksestä sekä lämmityksen tilapäisen katkaisemisen/ jaksottaisen lämmityksen vaikutuksista asunnon ja sen rakenteiden kosteustekniseen toimintaan, jotta lämmitystä ja sen tehoa voitaisiin optimoida ilman että kosteusriskit kasvavat. Peruslämmön korvaaminen kuivanapitolämmityksellä sekä sähkölämmityksen ja -tehon hallinta voivat parantaa koko valtakunnan sähkövoimajärjestelmän toimintamahdollisuuksia erityisesti kovimpien talvipakkasten aikaisissa huippukuormitus-/ tehonvajaustilanteissa. Lämmitystarpeen optimointiin soveltuvat esim. älykkäät seuranta- ja ohjausjärjestelmät, joihin voidaan tarvittaessa liittää myös etäkäyttöominaisuuksia. Jatkotutkimuksen avulla tulisi selvittää myös kuivanapitolämmityksen soveltuvuus vapaa-ajan asuntojen lisäksi mm. talousrakennuksiin sekä teollisuus- ja maatalousrakennuksiin.

## Lähdeluettelo

- [1] Hukka, A. & Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, Vol. 33, pp. 475-485.
- [2] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T. & Iitti, H. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 143. (julkaistaan vuonna 2009)
- [3] Piironen, J. & Vinha, J. Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti. (julkaistaan vuonna 2010)
- [4] 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*. Doctoral thesis. Tampere, Tampere University of Technology, Publication 658. 338 p. + app. 10 p.
- [5] Kurnitski, J. 2000. *Humidity control in outdoor-air-ventilated crawl spaces in cold climate by means of ventilation, ground covers and dehumidification*. Doctoral thesis. Espoo, Helsinki University of Technology, Report A3. 180 p.

## **12. Matalaenergia- ja passiivitalot**





# Pientalojen matalaenergiatalokonsepteja

Timo Kalema ja Jari Rintamäki  
TTY / Konstruktiotekniikan laitos

## Tiivistelmä

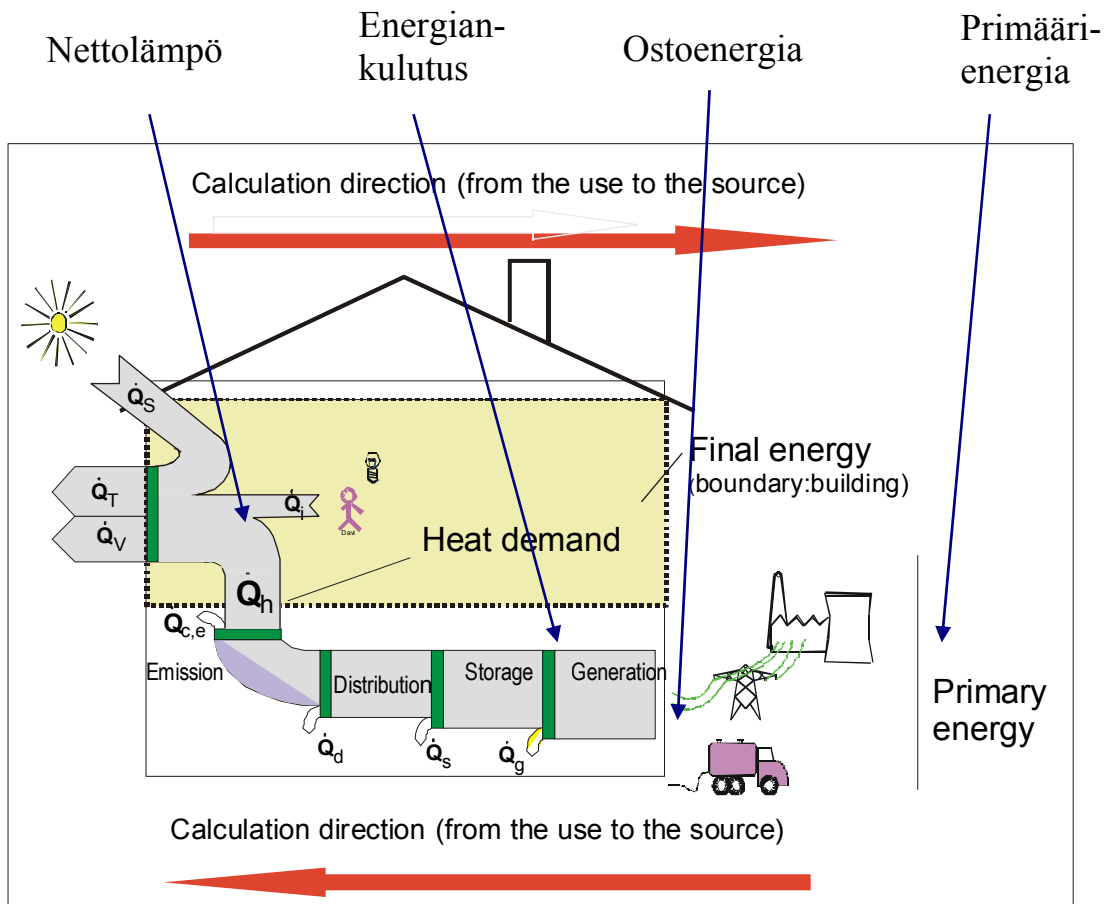
Työssä on tutkittu erilaisia matalaenergiapientalojen konsepteja, jotka on muodostettu käyttäen eri vaipan lämmöneristystasoja, poistoilman lämmön talteenottolaitteita, vaipan tiiviyyksiä ja eri energianlähteitä. Rakennusten energiankulutusta voidaan tarkastella eri tasoilla alkaen lämmön nettotarpeesta lämmityksen primäärienergian kulutukseen, joka kuvaa eri vaihtoehtojen energiankulutusta luonnonvarojen kulutuksen tasolla. Ostoenergian ja primäärienergian kulutuksen suhteen eri energianlähteet eroavat huomattavasti toisistaan. Energiankulutuksen lisäksi on verrattu eri vaihtoehtojen kustannuksia ja arvioitu eräiden vaihtoehtojen kesäajan sisälämpötiloja. Talokonsepteille on laskettu myös energiatehokkuusluokat lämmitysenergian kulutuksen perusteella. Tutkituissa vaihtoehdoissa tilojen lämmityksen nettoenergiatarve on alimmillaan noin  $20 \text{ kWh/m}^2$ , kun nykyisten rakentamismääräysten mukaan tehdyssä talossa tämä nettoenergian tarve on noin  $100 \text{ kWh/m}^2$ . Pienimpään ostoenergian kulutukseen päästään erilaisilla lämpöpumpuilla ja pienimpään primäärienergiankulutukseen puulämmityksellä ja kaukolämmöllä.

Rakennuksen energiatehokkuutta on mahdotonta määritellä yksikäsitteisesti ilman, että samalla täsmennetään mistä energiankulutuksesta on kyse. Työssä on tarkasteltu neljää energiankulutuksen tasoa: Tilojen lämmityksen energiantarve, lämmitysenergian kulutus mukaan luettuna käyttöveden lämmitys, lämmityksen ostoenergian kulutus ja lämmityksen primäärienergian kulutus.

## 1. Johdanto

Käsite matalaenergiatalo ei ole lainkaan yksikäsitteinen. Energia voi tarkoittaa tilojen lämmityksen nettoenergiaa, tilojen ja käyttöveden lämmityksen energiankulutusta mukaan luettuina teknisten järjestelmien lämpöhäviöt ilman energian lähteen osuutta, ostoenergian kulutusta tai primäärienergian kulutusta (kuva 1). Lisäksi energian kulutukseen voidaan sisällyttää tai olla sisällyttämättä apulaitteiden sähkönkulutus. Energiankulutus voidaan laskea sisä- tai ulkopinta-alaa kohti. Kun kulutus lasketaan ulkopinta-alaa kohti, ulkomittojen kasvu eristyspaksuuden kasvaessa parantaa energiatehokkuutta todellisen energiankulutuksen laskun lisäksi.

Tässä esityksessä on tarkasteltu energiatehokkuutta em. lähtökohdista. Energiankulutuksen ohella on tärkeää pystyä antamaan kuva uusien rakennusten energia- ja investointikustannuksista. Siksi myös kustannuksia on tarkasteltu. Tarkastelujen lähtökohdaksi on valittu erilailla eristetyistä ulkovaipoista, lämmön talteenottolaitteista ja lämmitysjärjestelmistä muodostuvia talokonsepteja.



Kuva 1. Energiankulutuksen tarkastelutasot.

## 2. Tarkastelujen lähtötietoja

Työssä tarkastellaan pientalojen matalaenergiatalokonsepteja, jotka muodostuvat vaipan lämmöneristyksestä ja tiiviyydestä, ilmanvaihdon lämmön talteenotosta ja energianlähteestä. Pientalo käsitellään yhtenä tilana, jonka pohjapinta-ala on sisämittojen mukaan  $130 \text{ m}^2$  ja sisätilavuus  $340 \text{ m}^3$ . Pohjapinta-ala ulkomittojen mukaan laskettuna (bruttopinta-ala), jota käytetään energiatehokkuuden laskennassa, riippuu ulkoseinien eristyspaksuudesta ja on  $142 - 155 \text{ m}^2$ . Talo on rakenteiltaan puutalo, jossa on maanvarainen betonilattia. Talon lämpökapasiteetti sisätilavuutta kohti on  $27 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ . Ikkunapinta-ala/lattia-ala on 12 %.

Tutkittujen talokonseptien lämmöneristystaso on nykyisten määräysten tasosta noin puolet pienempiin U-arvoihin (taulukko 1), poistoilman lämmön talteenoton tehokkuus nykyisten määräysten arvosta 30 % arvoon 70 %. Ulkovaipan tiiviyksille on käytetty arvoja nykymääräysten vaatimustasosta ( $n_{50}$ ) 4 l/h arvoon 0,6 l/h. Käyttöveden lämmityksen energiankulutus on kaikissa laskelmissa  $30 \text{ kWh/m}^2$ .

Taulukko 1. Vaipan lämmöneristyksen neljä tasoa (Case) ja ikkunoiden auringon säteilyn läpäisykerroin.

Vaipan osa		Lämmönläpäisykerroin (U)			
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Ulkoseinä	W/m <sup>2</sup> K	0,24	0,18	0,12	0,10
Maanvarainen lattia*	W/m <sup>2</sup> K	0,24	0,15	0,12	0,10
Yläpohja	W/m <sup>2</sup> K	0,15	0,15	0,09	0,08
Ikkuna, ulko-ovi	W/m <sup>2</sup> K	1,4	1,4	1,1	0,85
Säteilyn läpäisy		0,57	0,57	0,57	0,45

\* Sisältää maan lämpövastuksen

Perusenergianlähteet ovat sähkö, pohjavesilämpöpumppu, kaukolämpö ja öljy- ja pellettilämmitys. Pohjavesilämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on 2,5, öljylämmityksen kattilahyötysuhde 85 % ja pellettilämmityksen 80 %. Sähkö- ja kaukolämmityksen energianlähteiden hyötysuhteet ovat 100 %.

Lämmitysenergian kulutukset on laskettu DofEnergy-ohjelmalla Helsingin säätiedoilla. Kesäajan sisälämpötiloja on laskettu TASE-ohjelmalla. Lämmönjakelu- ja käyttövesijärjestelmän lämpöhäviöt on arvioitu YM:n RakMK D5:n mukaan siten, että häviöt ovat tasoilla Case 1 ja 2 sähkö- ja vesikiertoisella lattialämmityksellä varustetuissa taloissa 29 ja 53 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa ja kahden pienimmän kulutuksen omaavissa taloissa (Case 3 ja 4) 10 ja 20 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa. Lämmitysjärjestelmien laskennalliset lämpöhäviöt ovat siis erittäin suuria verrattuna esim. saksalaisen passiivitalon määritelmän mukaiseen vuotuisen tilojen lämmityksen energiankulutukseen 15 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa.

Järjestelmien hankintahinnat on pyritty arvioimaan realistisesti. Sähkölämmitys on halvin järjestelmä. Sen hankintahinta on 3500 €. Pohjavesilämpöpumppu yhdistettynä lattialämmitykseen on puolestaan kallein järjestelmä. Lämpöpumpun tehosta riippuen sen hinta on 14 000 – 18 000 €. Kaukolämmityksen hankintahinta on noin 10 000 € ja pellettilämmityksen noin 14 000 €.

Kustannuslaskennassa sekä rakennuksen että sen järjestelmien käyttöikä on 30 vuotta, reaalkorko 3 % ja energian hinnan reaalinousnopeus 2,5 % vuodessa. Laskennan alkuhetken energianhinnat ovat seuraavat: Sähkö 8,5 c/kWh, kaukolämpö 5,2 c/kWh, öljy 7,2 c/kWh ja pelletti 4,2 c/kWh.

Talokonsepteille on laskettu energiatehokkuusluokat (EP) standardilla EN 15217 (2007) Tässä luokittelu perustuu kahteen suureeseen: Rakentamismääräysten mukaisen uuden rakennuksen energiankulutukseen ( $R_p$ ) ja arvioituun, vastaavan tyyppisen rakennuksen energiankulutukseen rakennuskannassa ( $R_s$ ). Edellinen ( $R_p$ ) on 160 kWh/m<sup>2</sup>, kun lämmitys on suora sähkölämmitys, ja jälkimmäinen ( $R_s$ ) on 230 kWh/m<sup>2</sup>. Lämmitysenergian kulutukseen perustuva luokitus on silloin taulukon 2 mukainen:

Taulukko 2. Standardin EN 15217 (2007) mukaiset energiatehokkuusluokat sähkölämmitetyn talon energiankulutukselle.

Lämmitysenergian kulutus, kWh/m <sup>2</sup>	Energiatehokkuusluokka EP
EP < 80	A
80 ≤ EP < 160	B
160 ≤ EP < 190	C
190 ≤ EP < 215	D
215 ≤ EP < 270	E
270 ≤ EP < 320	F
EP ≥ 320	G

Eristettyjen rakenteiden optimaalinen eristystaso riippuu olennaisesti lisäeristämisen yksikkökustannuksesta eristetilavuutta kohti (taulukko 3). Tämä kustannus sisältää eristeen asentamisen ja materiaalikustannuksen lisäksi mahdollisista lisärungoista ja pinta-alojen kasvusta muodostuvat kustannukset. Yläpohjan lisäeristäminen on halvinta. Ulkoseinien lisäeristämisen kustannuksiin vaikuttaa se, että seinien eristepaksuuden kasvattaminen kasvattaa ulkoseinien, katon ja lattian pinta-aloja ja perustusten mittoja. Maanvaraisen lattian suhteellisen korkea kustannus johtuu korkealuokkaisesta lämpöeristeestä.

Taulukko 3. Ulkovaipan lämmöneristämisen marginaalikustannus laskettuna eristetilavuutta kohti.

Vaipan osa	Eristämisen marginaalikustannus
	€/m <sup>3</sup>
Ulkoseinä	190
Maanvarainen lattia	320
Yläpohja	60

Primäärienergiankulutus on suure, jolla voidaan arvioida rakennuksen lämmityksen aiheuttamaa luonnonvarojen kulutusta. Tämä kulutus riippuu luonnollisesti käytettävistä primäärienergiakertoimista. Helsingin kaupungin tuottaman kaukolämmön primäärienergiakerroin 0,45, sähkön tuotantotavasta riippuen noin 2,5 – 3 ja puun ja pelletin uusiutumattoman energian osuuden 0,1 – 0,2 (taulukko 4). Standardit EN 15603 ja DIN V 4701-10 antavat tavallisimpien energianlähteiden primäärienergiakertoimet.

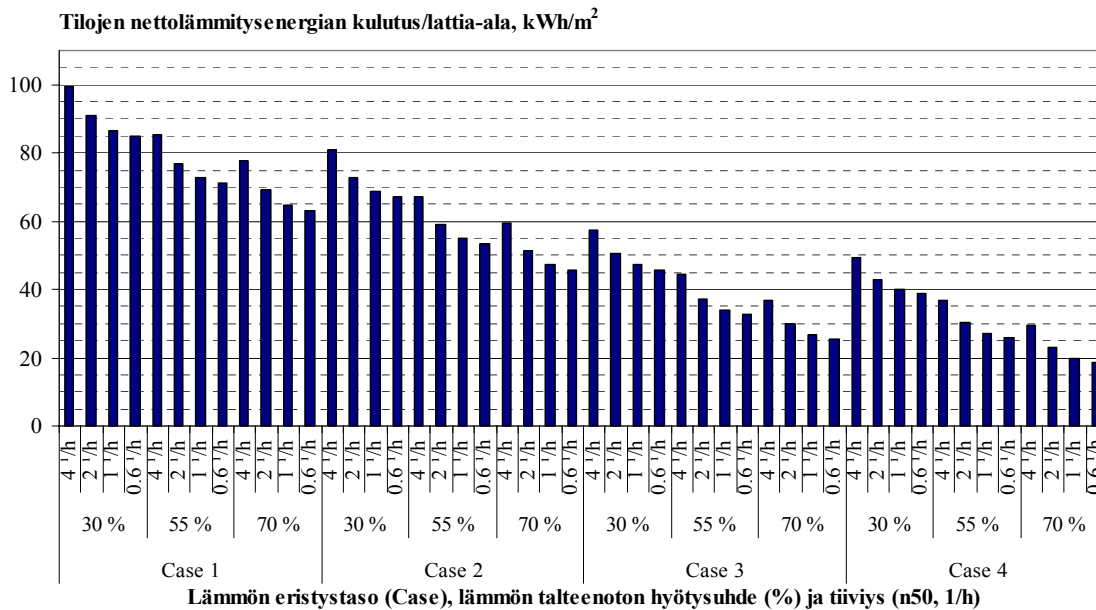
Taulukko 4. Eri energianlähteiden primäärienergiakertoimien suuruusluokka.

Energianlähde	Primäärienergiakerroin	
	EN 15603	DIN V 4701-10
Sähkö*	2,5	2,7
Kaukolämpö*	0,45	0,7
Öljy	1,15	1,1
Puupelletti Uusiutumaton osuus	0,12	0,2

\* Kertoimet riippuvat polttoaineista

### 3. Tuloksia

Helsingin olosuhteissa nykyiset rakentamismääräykset täyttävän pientalon tilojen lämmityksen nettoenergian tarve on noin 100 kWh/m<sup>2</sup>. Pienimmillään nettoenergia on noin 20 kWh/m<sup>2</sup> (kuva 2). Käyttöveden lämmityksen energiankulutus on puolestaan tämän työn laskelmissa 30 kWh/m<sup>2</sup>.

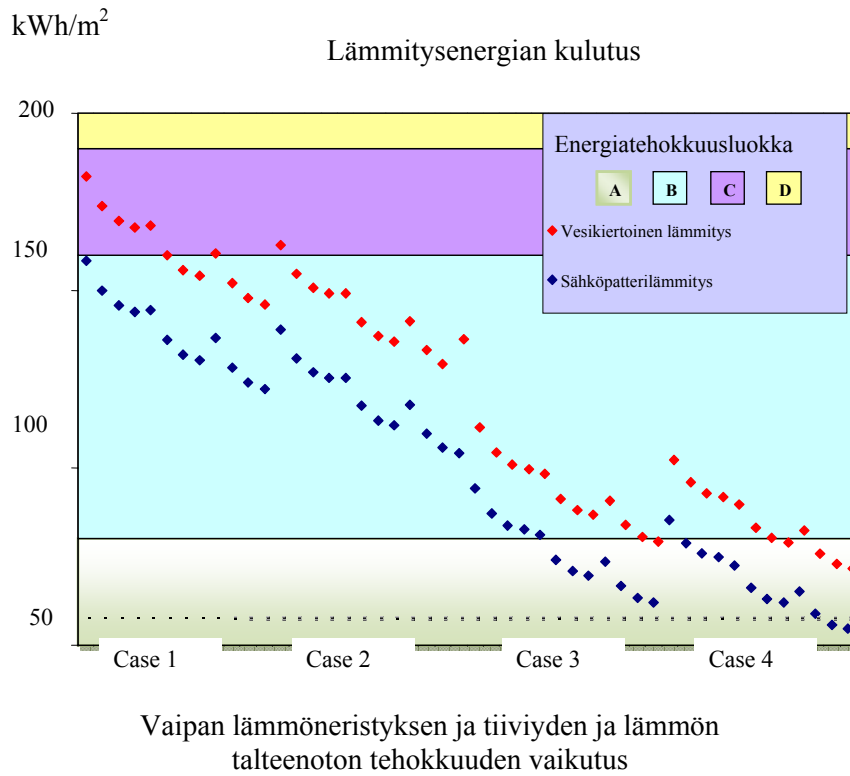


Kuva 2. Tilojen lämmityksen energiantarve lattiapinta-ala kohti erilaisille vaipan lämmöneristysten (Case), lämmön talteenoton hyötysuhteen (%) ja vaipan tiiviiden (1/h) tasoilla.

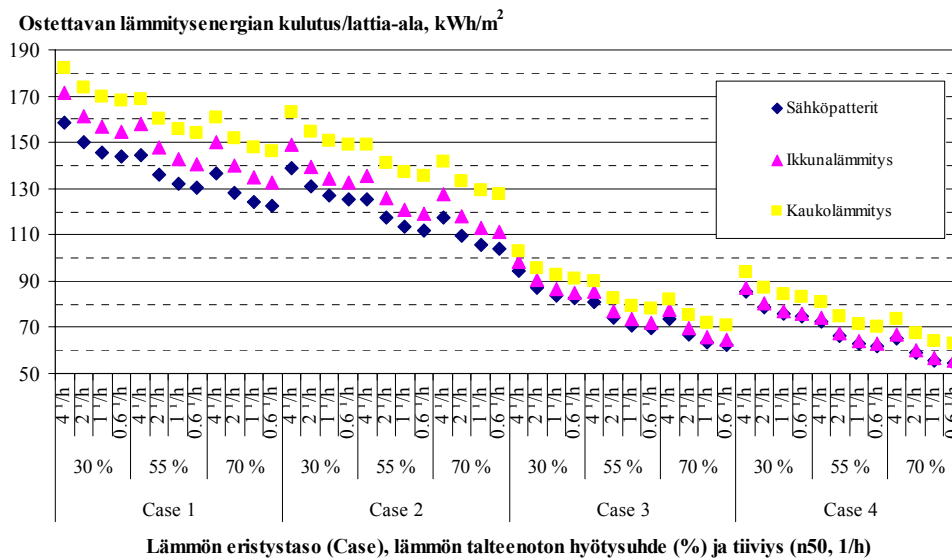
Jos energiatehokkuusluokka lasketaan lämmitysenergian kulutuksen perusteella standardin EN 15217 mukaan, nykyiset rakentamismääräykset täyttävien talojen luokitus on B – C. Sähkölämmityksessä on pienemmät lämpöhäviöt kuin vesikiertoisessa lämmityksessä ja siksi myös hieman parempi luokitus. A-tason saavuttaminen vaatii kahden parhaimman vaipan lämmöneristystason (Case 3 ja 4) käyttöä ja Case 3:ssa myös hyvää vaipan tiiviyyttä ja tehokasta lämmön talteenottoa (kuva 3).

Eri energianlähteiden hyötysuhteet eroavat paljon toisistaan. Kattiloiden hyötysuhteet ovat noin 80 – 85 %, sähkö- ja kaukolämmityksen noin 100 % ja erilaisten lämpöpumppujen noin 150 – 300 % (lämpökerroin 1,5 – 3,0). Nämä suuret erot näkyvät suoraan ostoenergian kulutuksessa, joka on tutkituille talokonsepteille noin 25 – 200 kWh/m<sup>2</sup> (kuvat 4 ja 5).

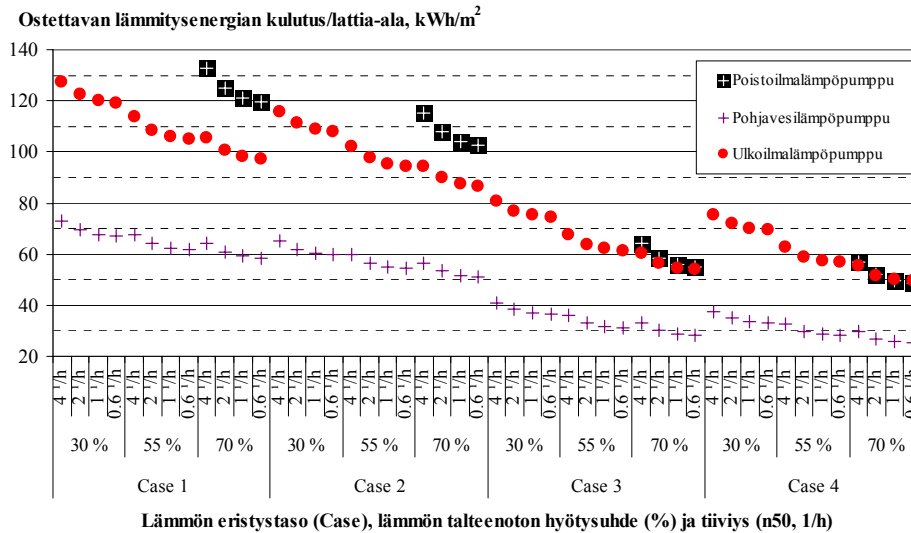
Primäärienergian kulutus on uusi mielenkiintoinen energiatehokkuuden tarkastelutapa, koska se ottaa huomioon tietyllä tavalla luonnonvarojen kulutuksen. Esim. Saksassa rakennusten energiatehokkuus lasketaan primäärienergian kulutuksen mukaan. Primäärienergian kulutus on kuvan 3 energiankulutus jaettuna energianlähteen hyötysuhteella ja kerrottuna primäärienergiakertoimella. Primäärienergian käytön kannalta tehokkaimpia järjestelmiä ovat puu ja pelletti ja kaukolämpö niiden pienen primäärienergiakertoimen vuoksi. Lämpöpumpulla on korkea energianlähteen hyötysuhde, mutta primäärienergian käytön näkökulmasta hyvä hyötysuhde häviää sähkön korkeaan primäärienergiakertoimeen. Sähkölämmitys on primäärienergian kulutuksen kannalta huonoin vaihtoehto (kuva 6).



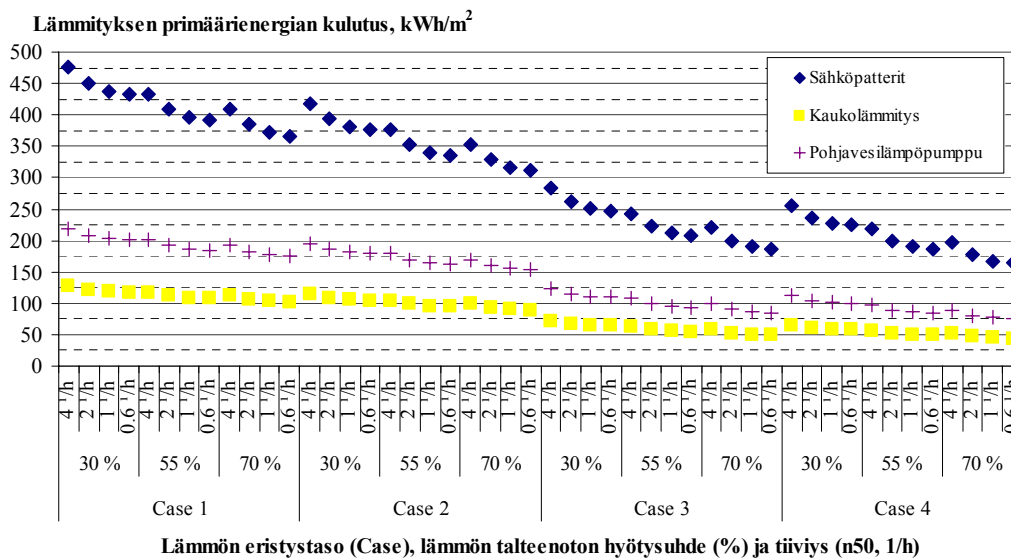
Kuva 3. Standardin EN 15217 (2007) mukainen energiatehokkuusluokitus talokonsepteille.



Kuva 4. Lämmityksen ostoenergian kulutus sähköpatterit-, ikkuna- ja kaukolämmitykselle eri talokonsepteissa.

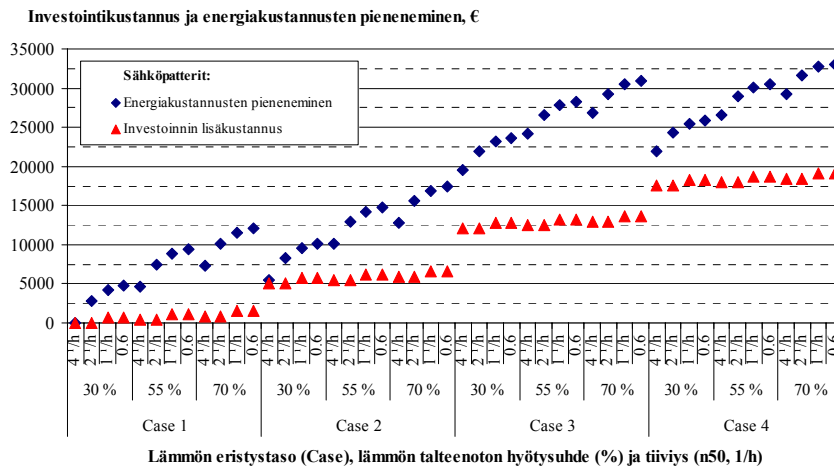


Kuva 5. Lämmityksen ostoenergian kulutus kolmelle lämpöpumppujärjestelmälle eri talokonsepteissa.

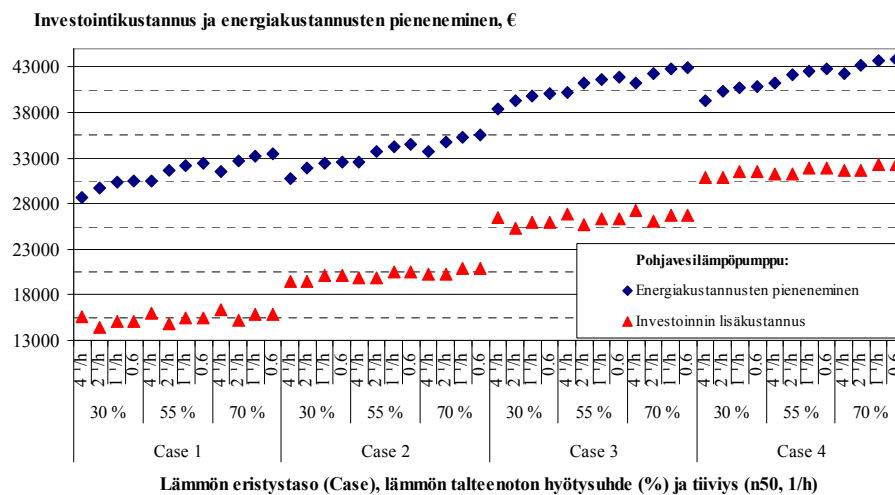


Kuva 6. Sähkö- ja kaukolämmityksen ja pohjavesilämpöpumpun primäärienergian kulutus standardin DIN V 4701-10 (2001) mukaisilla kertoimilla eri talokonsepteille.

Panostus hyvään lämmöneristykseen ja tehokkaaseen lämmitysjärjestelmään on yleisesti kustannustehokasta (kuvat 7 ja 8). Niiden avulla voidaan saavuttaa 30 vuoden ajanjaksolla noin 5000 – 15 000 euron kustannussäästöt verrattuna vertailukohtaksi valittuun rakentamismääräykset täyttävään sähkölämmitettyyn pientaloon.



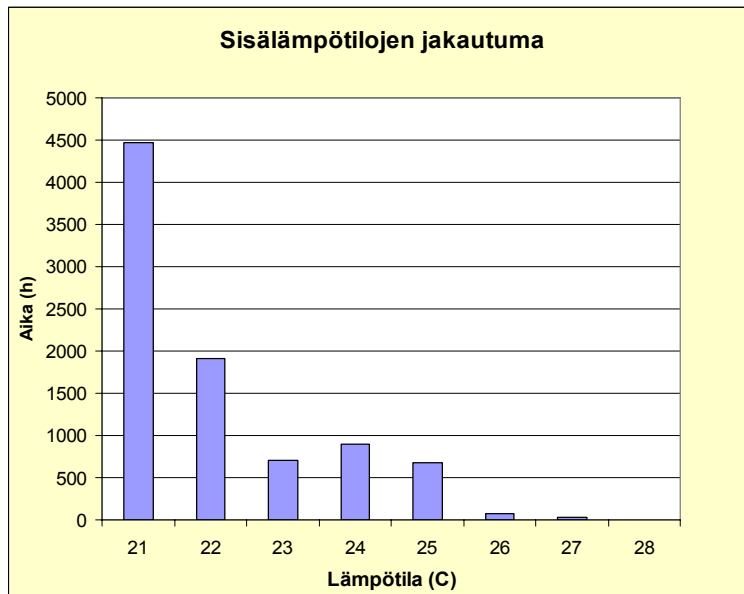
Kuva 7. Energiansäästötoimien lisäinvestoinnit ja 30 vuoden energiansäästön nykyarvo eri talokonsepteille. Kaikissa tapauksissa energianlähde on sähkö.



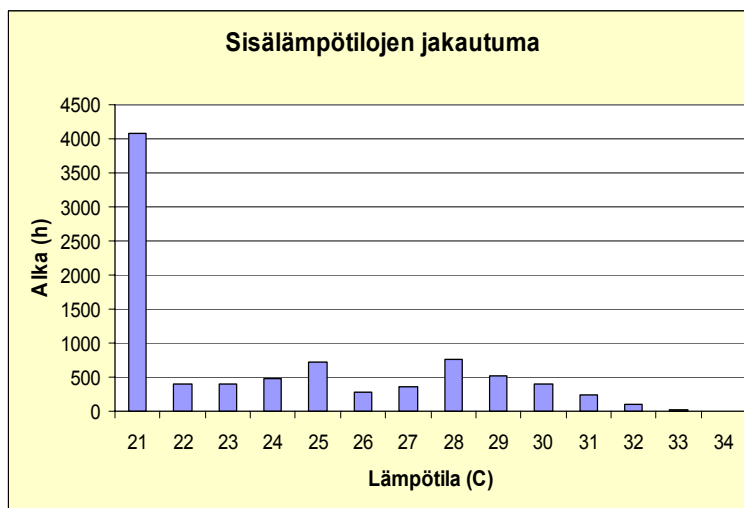
Kuva 8. Energiansäästötoimien lisäinvestoinnit ja 30 vuoden energiansäästön nykyarvo eri talokonsepteille. Energianlähde on pohjavesilämpöpumppu ja vertailukohta on määräykset täyttävä sähkölämmitetty talo.

Hyvin lämpöeristettyjen pientalojen sisälämpötilat nousevat kesällä korkeiksi ilman tehokasta tuuletusta. Kuva 9 näyttää, että tehokkaalla tuuletuksella kesäajan sisälämpötiloja voidaan alentaa olennaisesti.





Tuuletusilmanvaihto 0,5 – 2,5 1/h  
lämpötiloissa 23 – 26 °C



Ei tuuletusta

Kuva 9. Tuuletuksen vaikutus Case 4-vaipan mukaisen talon sisälämpötiloihin. TASE-ohjelmalla laskettu tulos.

#### 4. Yhteenveto

Tärkeimmät tulokset voidaan kiteyttää seuraavaan:

- Tutkittujen talokonseptien tilojen lämmityksen energiantarve (nettolämpö) on määräystason arvosta 100 kWh/m<sup>2</sup> tasolle 20 kWh/m<sup>2</sup>.
- Lämmitysenergian kulutus, joka sisältää käyttöveden lämmityksen ja lämmönjakojärjestelmien häviöt, on määräystason kulutuksesta 170 kWh/m<sup>2</sup> tehokkaimpien konseptien tasoon 50 kWh/m<sup>2</sup>.
- Energiatehokkuusluokan A saavuttaminen vaatii kahden parhaimman vaipan lämmöneristystason käyttöä. Energiatehokkuus on laskettu em. lämmitysenergian kulutuksen mukaan Suomen nykyisen käytännön mukaisesti ilman energianlähteen häviöitä (esim. öljylämmitys) tai ns. ilmaisenergian hyödyntämistä (lämpöpumppu).

- Lämmityksen ostoenergian kulutuksen vaihtelu on erittäin suuri eri järjestelmien välillä johtuen suurista eroista energianlähteiden hyötysuhteissa. Pienimmillään ostoenergiankulutuksessa päästään pohjavesilämpöpumpulla tasoon 30 kWh/m<sup>2</sup>. Määräystason talossa pohjavesilämpöpumpun ostoenergia on noin 70 kWh/m<sup>2</sup>. Öljy- ja pellettikattiloilla on alin energianlähteen hyötysuhde ja vastaavasti korkein ostoenergiankulutus, talon lämmöneristystasosta riippuen noin 80 – 200 kWh/m<sup>2</sup>.
- Yleisesti kaukolämmityksen ja biopolttoaineiden primäärienergian kulutus on Suomen oloissa pienin, talon lämmöneristystasosta riippuen noin 25 – 75 kWh/m<sup>2</sup>. Suurin primäärienergian kulutus on sähkölämmityksellä, noin 125 – 400 kWh/m<sup>2</sup> talon lämmöneristystasosta riippuen. Pohjavesilämpöpumpulla varustettujen talojen primäärienergian kulutus on noin 60 – 160 kWh/m<sup>2</sup>.

Yleisesti tutkitut matalaenergiatalovaihtoehdot ovat taloudellisesti kannattavia. Kesäajan sisälämpötilojen nouseminen epämiellyttävän korkeiksi voidaan estää tehokkaalla tuuletuksella.

## Lähdeluettelo

- [1] Aittomäki, A. & Kalema, T., TASE - tietokoneohjelma rakennusten lämpötaseen laskemiseksi. Moniste. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI - tekniikan laboratorio. Espoo 1976.
- [2] Dof-Energy. [www.doftech.com](http://www.doftech.com)
- [3] EN 15217. 2007 Energy performance of buildings. Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings. 28 pp.
- [4] EN 15603. 2008 Energy performance of buildings - Overall energy use and definition of energy ratings. 62 pp.
- [5] Haapala, T., Kalema, T. & Tala, J., TASE - Tietokoneohjelma rakennusten lämpötaseen laskentaan. Versio 2.0. Tampereen teknillinen korkeakoulu, lämpötekniikan laitos. Tampere 1989, 58 s + liitteet.
- [6] ISO/DIS 13790. 2005. Thermal performance of buildings: Calculation of energy use for space heating and cooling. 98 pp.
- [7] Kalema, T., Optimisation of the thermal performance of buildings – The OPTIX program. Int. Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol 2, 2001 – 2002. <http://www.ce.kth.se/bim/leas/>
- [8] Motiva: Lämmitysjärjestelmien vertailu [WWW]. <http://lammitysjarjestelmat.hosting.ambientia.fi/tyyppitalovertailu.php>
- [9] Pyly, P. ja Kalema, T., Concepts for Low-Energy Single-Family Houses 2009, Tampere, Tampere University of Technology. Department of Mechanics and Design. Research Report 1, 64 pp.
- [10] Pyly, P. ja Kalema, T., Matalaenergiapientalojen konsepteja – Vaipan lämmöneristykseen, lämmitysjärjestelmän ja lämmön talteenoton vaikutus energiankulutukseen ja energiakustannuksiin. 2009, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, konstruktitekniikka. Raportti. 47 s.
- [11] Rakennusosien kustannuksia 2006. 2006. Helsinki, Rakennustieto.

## Raahen Kummatti – pura ja rakenna projekti 1970-luvun lähiössä

Harri Hagan<sup>1</sup> ja Petri Kontukoski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laitos

<sup>2</sup> Arkkitehtitoimisto Harri Hagan / Arkkitehdit Kontukoski Oy

### Tiivistelmä

Suomalaisia lähiöitä ja niiden kehittämistä on tutkittu tähän saakka pääasiassa sosiaalisesta näkökulmasta, mutta huomattavasti vähemmän on keskitytty energiatehokkuuteen, arkkitehtuuriin ja rakennustekniikkaan. Nämä osa-alueet ovat kuitenkin nousemassa yhä tärkeämmiksi johtuen uusista energiansäästö määräyksistä, CO<sub>2</sub> päästötavoitteista sekä tarpeesta parantaa lähiöiden imagoa ja lisätä niiden vetovoimaisuutta sosiaalisen segregaaation ehkäisemiseksi.

Lähiöiden korjaus- ja täydennysrakentaminen on lähitulevaisuuden mittava urakka, jolle energiatehokkuuden tavoitteet asettavat vaativia haasteita. 1970-luvun elementtirakenteiden lisälämmöneristäminen edellyttää tarkempia teknisiä tutkimuksia, samoin lämmön talteenotto, tuuli- ja aurinkoenergian hyödyntäminen ja muut uudet tekniikat. Näillä toimenpiteillä, samoin kuin täydennysrakentamisella ja mahdollisella purkamisella, on myös huomattavia vaikutuksia lähiöiden ilmeeseen ja arkkitehtuuriin. Raahen Kummatin lähiön peruskorjausprojekti pyrkii osaltaan vastaamaan näihin haasteisiin.

### 1. Projektin taustaa

Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA ja 40 kunnan yhteinen Käyttöasteprojekti, jossa Raahen kaupunki on mukana, prosessoi Kiinteistö Oy Kummatin järjestämään arkkitehtuurikilpailun v.2006. Kilpailulla haettiin ideoita osittaiseen rakennusten purkamiseen ja huoneistokokojen pienentämiseen. Kaikkein ”taloudellisin” malli, joka kolmannen rakennuksen kokonaan purkamisen kiellettiin, koska nimenomaan haettiin ratkaisuja koko alueen vetovoimaisuuden kohentamiseksi. Yksi talo vähemmän siellä ja pari kerrosta toisesta pois – ”taloudellisin” ratkaisu ei ehkä olisi kuitenkaan tuonut tavoiteltavaa muutosta alueen ilmeeseen ja imagoon.

Raahen Kummatin projekti on yksi ratkaisumalli alueilla, joissa on selkeästi käyttöasteen suhteen ongelmia. Raahessa puretaan joka kolmas asunto ja loput korjataan mahdollisimman viihtyisiksi ja energiatehokkaiksi. Myös koko alueen pihajärjestelyt ja ”imago” pyritään uudenaikaistamaan. Tämä kaikki tapahtuu tiukkojen taloudellisten rajoitusten puitteissa, joten panos-tuotos ajattelu on suuressa merkityksessä suunnitteluvalintoja tehtäessä.

Alueella on nyt 13 kerrostaloa, joissa 364 asuntoa. Alueelta puretaan n. 120 asuntoa, pääasiassa isot perheasunnot. Tuleva asuntojakauma, noin 50 neliön kaksiot, ovat tällä hetkellä ehdottomasti halutuin huoneistotyyppi. Osaan kerrostaloja tulee selkeästi senioriasumisen mahdollistavia palveluja, mm. asukastupa, joka mahdollistaa aktiivisen toiminnan myös talon sisällä. Rakennuksiin liitetään myös ”oma” aidattu piha, jossa on viherhuone ja puutarha pienviljelyyn. Kohteen toteutus ajoittunee vuosien 2008-2012 välille, muutama korjattava rakennus vuodessa. Tällä hetkellä (lokakuu 2009) on kolme matalampaa rakennusta valmistunut ja neljä tornitaloa rakennustyömaana.

## 2. Raahen Kummatti – pura ja rakenna projekti



*Kuva 1. Rakennus ennen purkamista.*

*Kuva 2. Rakennus purkamisen jälkeen.*

### 2.1 Korjata vai purkaa?

1970-luvun elementtitekniikka ei ollut niin huonoa kuin mediassa on esitetty. Rakennusten runko ja tilaratkaisut ovat käyttökelpoisia vielä pitkälle tulevaisuuteen. Julkisivuelementtien ulkokuori on joissain tapauksissa tullut käyttöikänsä päähän, mutta nykyisillä lisälämmöneristysjärjestelmillä ja suojaavilla julkisivupinnoitteilla asia on helposti ratkaistavissa. Rakennusosien korjaaminen ja kunnostaminen on luonnollinen prosessi rakennetussa ympäristössä ja sopusoinnussa Kestävän Kehityksen periaatteiden kanssa. Raahen Kummatissa valtaosa purettavasta materiaalista menee kierrätettäväksi, mm. betonielementit murskataan ja teräkset erotellaan. Valtaosa purettavista umpielementeistä uusiokäytetään alueen piharakennuksissa, huoltorakennuksissa ja autokatoksissa.

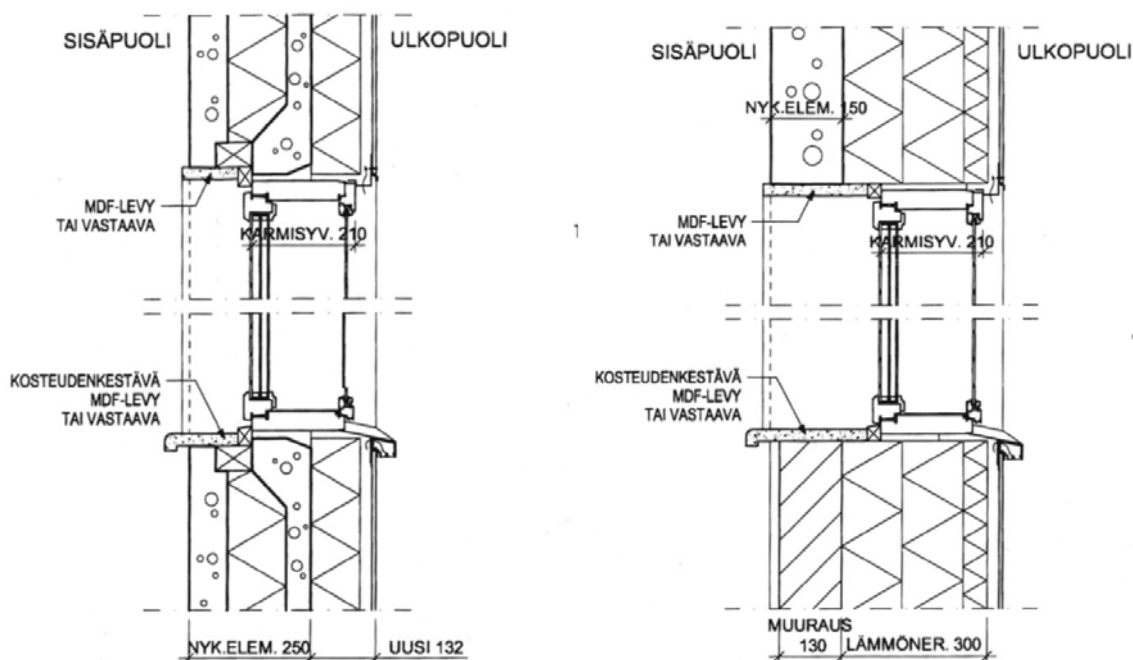


*Kuva 3. Purettavat elementit joko murskattiin ja teräkset eroteltiin tai ne käytetään uudestaan kylmissä piharakennuksissa.*

## 2.2 Energiatehokkuus – villapaita myös rakennuksille

Kummatin alueen rakennusten energiatehokkuus on huono, vaikka niiden solidi massoittelu onkin energian käytön kannalta edullinen. Tuulisella paikalla, meren läheisyydessä sijaitsevat betonipintaiset, sateella kastuvat elementit ja rapistunut saumaus sekä ikäänntyneet ikkunat ja ilmanvaihdon hallitsemattomuus ovat keskeisiä ongelmia energiatalouden suhteen.

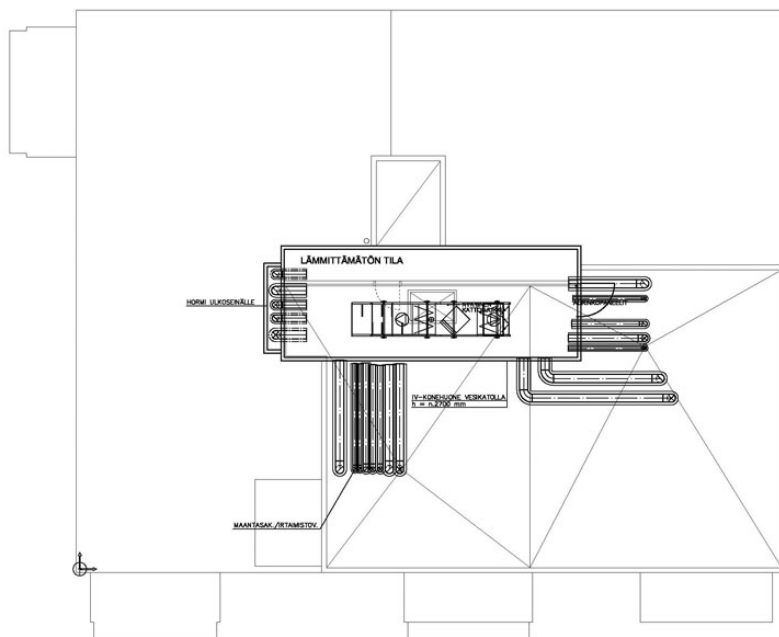
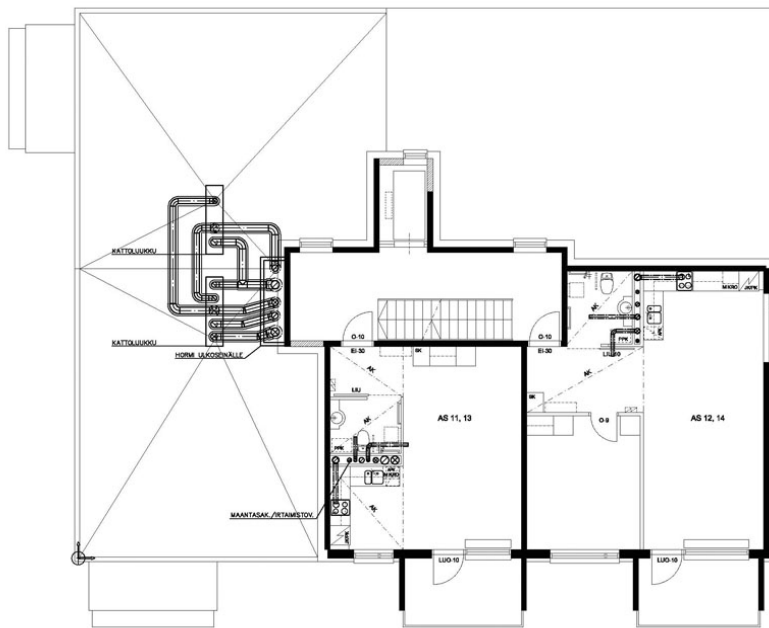
Rakennusten ulkovaipat lisälämmöneristetään ja pinnoitetaan kosteutta hylkivillä, ekologisesti vähäpäästöisillä komposiittilevyillä. Vanhan rakenteen kuivuminen varmistetaan saumojen aukaisuilla. Lämmöneristys on purettavien seinäosien kohdalla n. 300 mm, joka ylittää nykyiset uudistuotantovaatimukset ja on ns. matalaenergiatasoa. Ikkunat uusitaan ”energiaikkunoiksi” ja rakennuksiin lisätään lämmöntalteenottolaitteisto. Myös kaikki ulko-ovet uusitaan.



Kuva 4. Uusia seinärakenteita. Vasemmalla nykyisen sandwich-elementit päälle tehty lisälämmöneristys 100 mm, oikealla vanhan betoniväliseinän päälle tehty lämmöneristys 300 mm. Uudet ikkunasovitukset pyritty laittamaan mahdollisimman lähelle julkisivun ulkopintaa.

Aurinkoenergiakennostot tulevat kattokerrokseen, lämmöntalteenottolaitteiston edellyttämän konehuoneen eteläseinustalle ja kattopinnalle. Seinäpinnalle asennetut kennot hyödyntävät matalaa talviaurinkoa ja kattopinnalla olevat lähinnä kesäaikaista tuottoa. Piikenojen sähköntuotto invertoidaan suoraan talon omaan käyttöön. Tuuliturbiinit katolla tuottavat sähköä myös suoraan talon verkkoon. Tuskin energiaa jää myytäväksi mutta varsin pieneen sen ostaminen myös jää.

Suurimpia energiasäästötoimenpiteitä lienee kuitenkin lisälämmöneristys ja ulkovaipan tiivistäminen sekä lämmöntalteenottolaitteisto. Lämpimän käyttöveden sisältämän energiatalteenotto on myös tutkittavana.



Kuva 5. Lämmöntalteenottolaitteiston vaatimia uusia hormi- ja tilavarauksia.

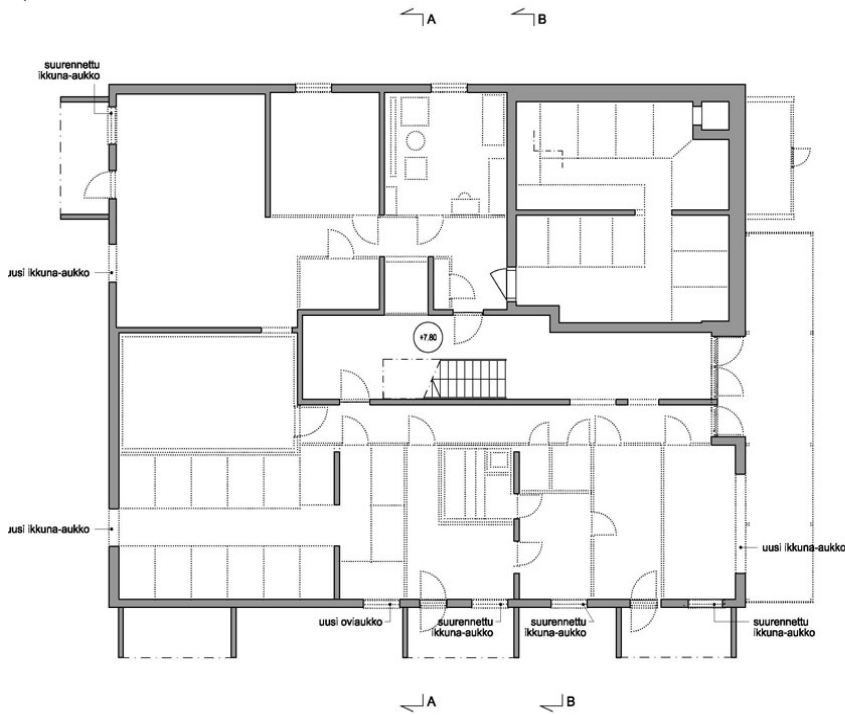
### **2.3 Muuttuva asukasrakenne – muuttuva talo**

Väestörakenteen muutokset edellyttävät uusien asuntotyyppien lisäämistä olemassa oleviin rakennuksiin. Uuden teknologian ja typologioiden kehittäminen ja integrointi olemassa olevaan rakennuskantaan ja lähiöihin ei onnistu tavanomaisten suunnitteluprojektien yhteydessä. Tästä syystä tarvitaan tutkimusta, visiointia, koerakentamista ja seurantaa. Vaikka energiatehokkuuden vaatimukset asettavat suuria haasteita, ne voidaan nähdä myös mahdollisuuksina, joilla lähiöiden käytettävyys, ilme ja imago saadaan päivitettyä 2000-luvulle.

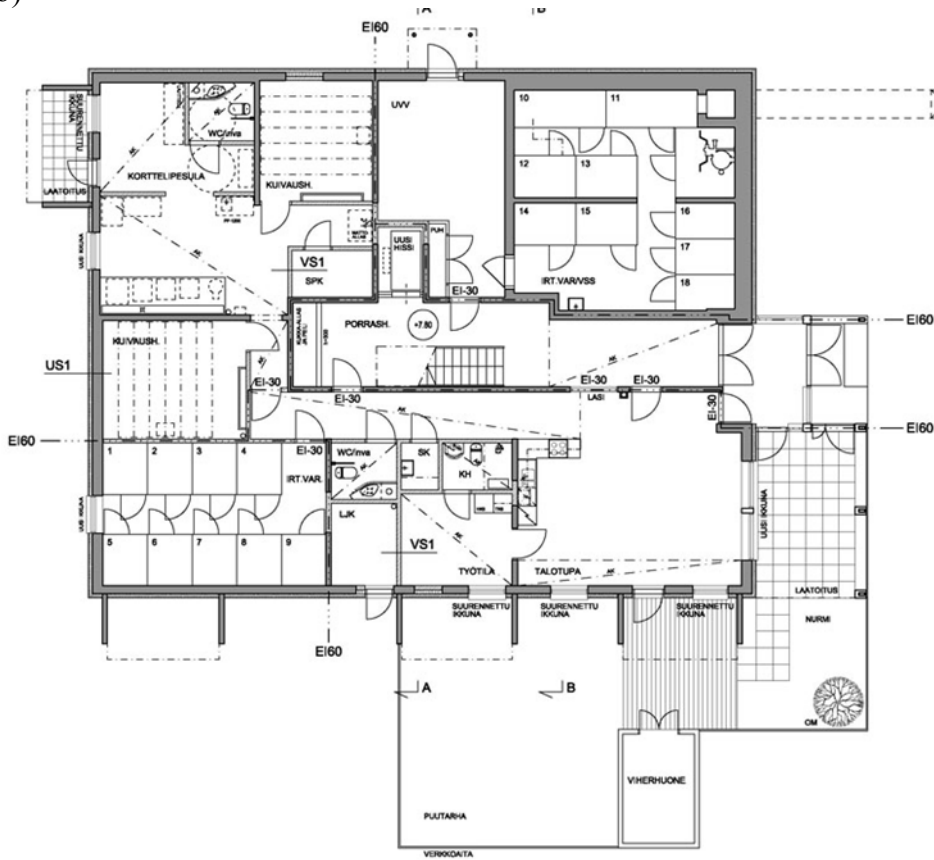
Kummatissa kaikki asunnot kunnostetaan ns. esteettömiksi kylpyhuoneratkaisujen ja huoneistojen ”avoimuuden” suhteen. Hissit suurennetaan pyörätuoli- ja rollaattoriliikenteelle sopiviksi. Talotekniikassa (talo-TV, tekniset hälytysjärjestelmät, yms.) pyritään hyödyntämään viimeisin alan tekniikka.

Saunaosastot siirretään kattokerrokseen, jossa on myös ns. kuntohuone ja vilvoittelumahdollisuus. Nykyisen, varsin kolkon maantasokerroksen luonnetta avarretaan lasiovilla ja yhteiskeittiöllä varustetulla asukastuvalla. Pihoille istutetaan lähinnä hyötykasveja, kuten omenapuita ja marjapensaita.

a)



b)



Kuva 6. Rakennuksen maantasokerros a) ennen ja b) jälkeen korjauksen.



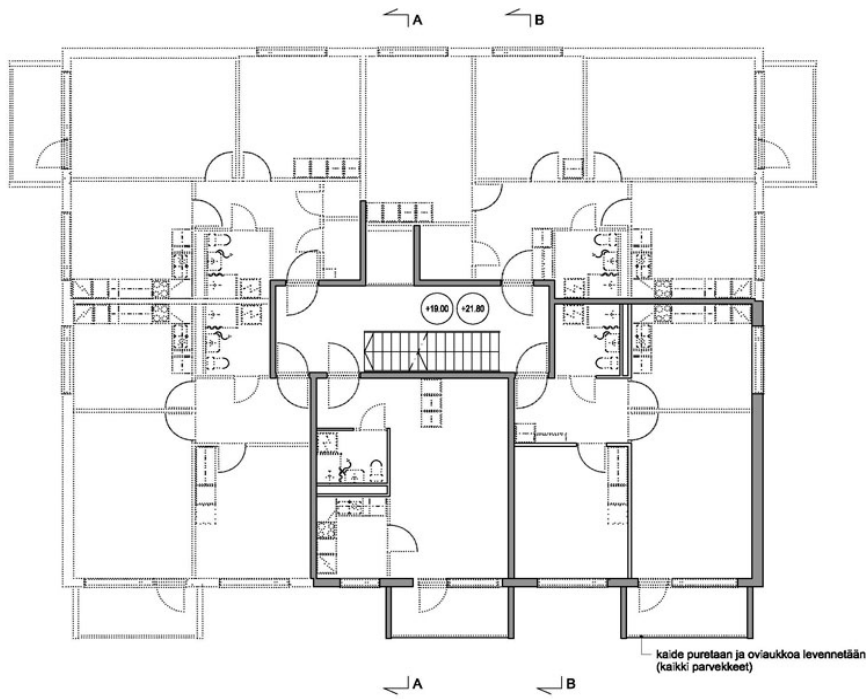
## 2.4 Tutkimuksen ja koerakentamisen aihealueita lähiökorjaamisessa:

Raahen Kummatissa on suunnitteluprosessin aikana tutkittu rakennustekniikan (RLVISA) seuraavia aihekokonaisuuksia:

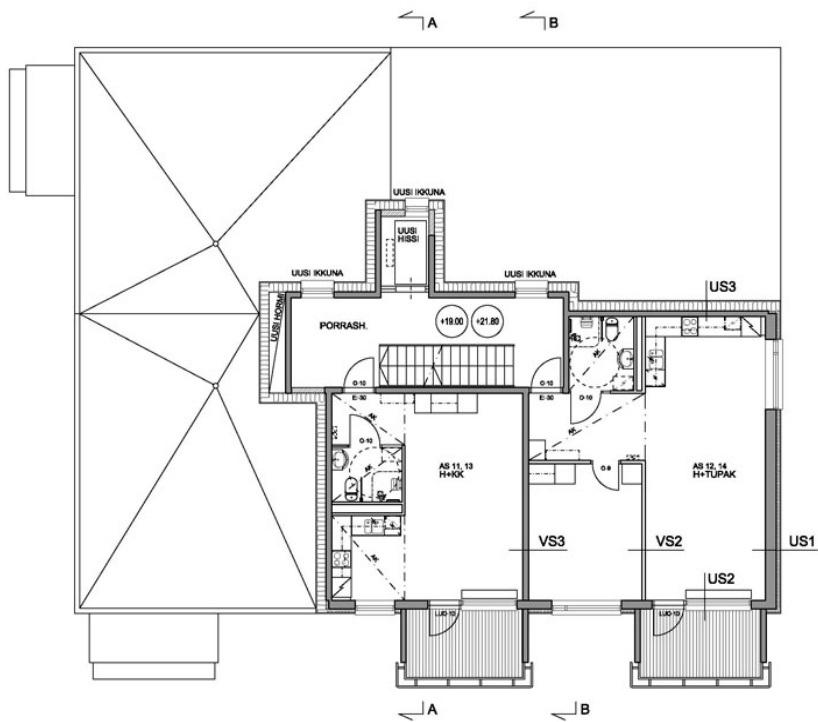
1. millaisilla rakennusteknisillä toimilla lähiöiden *olemassa olevien* asuinrakennusten energiatehokkuustavoitteet voidaan saavuttaa;
2. millaista on lähiöiden energiatehokas *täydennysrakentaminen* rakennusteknisesti, sekä asemakaava- ja korttelisuunnitelmatasoilla; erityistä huomiota tulisi kiinnittää alueen arkkitehtuuriin, viihtyisyyteen sekä pysäköintiratkaisuihin;
3. kuinka energiatehokas korjaus- ja täydennysrakentaminen, johon kuuluu uusien teknologioiden soveltaminen, on ratkaistavissa arkkitehtonisesti tyydyttävällä tavalla; millaista on ekologinen estetiikka tässä tapauksessa;
4. kuinka olemassa olevat asunnot on korjattavissa niin että lähiöiden asuntotypologiaa saadaan laajennettua vastaamaan nykyisiä tarpeita, elinkaariasumisen periaatteita, sekä muuttuvia elämäntapoja (maahanmuuttajat ja muut väestörakenteen muutokset)

Energiatehokkuuden lisäksi läpikäyvinä teemoina on ollut saavutettavuus ja esteettömyys, jotka tässä yhteydessä tarkoittavat lähiön soveltumista kaikille ikä- ja ihmisryhmille mukaan lukien liikuntaesteiset ja autottomat kotitaloudet.

a)



b)



Kuva 7. a) purettavat rakennusosat yläkerroksissa, b) uusi huoneistojakauma.

## 2.5 Tulevaisuuden rakennustekniikat ja ekoarkkitehtuuri?

1970-luvun elementtitekniikka oli oman aikansa huippua. Lämmöneristysvaatimukset olivat kuitenkin oleellisesti vähäisemmät kuin nykyään eikä rakennusten ilmanpitävyyttä ja lämmöntalteenottoa pidetty tärkeänä. Talotekniikan kehitys on kuitenkin sen jälkeen ollut merkittävä erityisesti LVISA-sektoreilla. Tässä suhteessa lähiörakentaminen vaatii merkittäviä parannuksia talotekniikan alueella ja rakennusten vaipan suhteen. Ehkä uudet materiaalitekniikat ja uusiutuvien energialähteiden käyttö tulevat muuttamaan merkittävästi rakennusten tekniikkaa ja arkkitehtuuria?

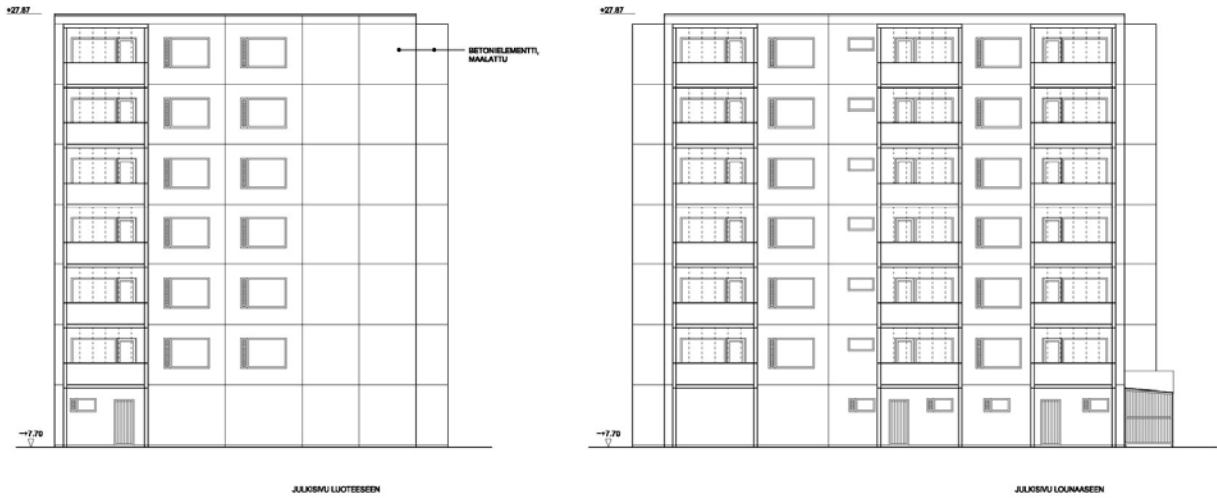
Perinteinen käsitys ekologisesta rakentamisesta

- elämäntapamuutos
- paikallisuus, kulutuksen vähentäminen
- luonnonmukainen rakentaminen, paluu maalle
- viherrakentaminen, perinteiset rakentamistavat

Tulevaisuuteen uskova teknologiapainotteinen rakentaminen

- rakennusten energiatehokkuus saatava muiden tekniikan alojen tasolle
- uudet teknologiat käyttöön tutkimusta ja koerakentamista lisäämällä
- kesäaikaisen jäädytystarpeen vaikutus rakennusten muotoon ja yksityiskohtiin
- tilasuunnittelun tehokkuus, passiiviset energiantuottomuodot, suojavyöhykkeet
- materiaalitekniikka
- geotermiinen tekniikka, lämpöpumput, lämmön talteenotto (LVI)
- tuulivoima
- aurinkotekniikka (nanokennot, biokennot, kvanttifysiikka)
- lasitekniikka
- biomateriaalit, nanotekniikka
- biomimetikka, bionikka
- fuusioenergia, fotosynteesi

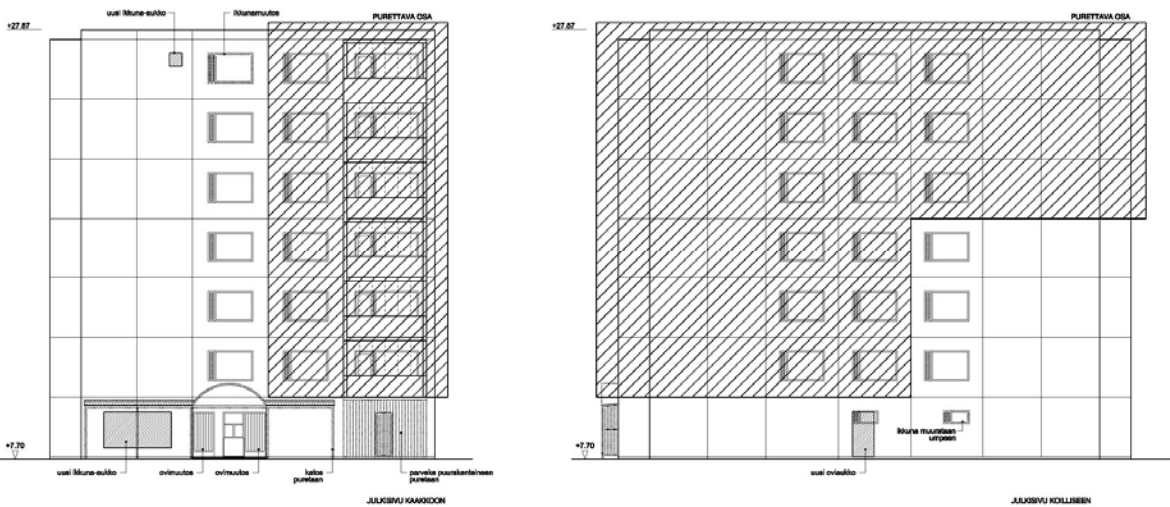
On ilmeistä, että näiden molempien kehityssuuntien kombinaatiolla saavutetaan kestävä kehityksen edellyttämä tasapaino. Liian tekniikkapainotteinen rakentaminen on myös riskialtista pitkällä tähtäimellä. Toisaalta juuri tekniikan kehittyminen on tuottanut energiatehokkuutta esimerkiksi autoteollisuudessa.



Kuva 8. Rakennuksen nykyisiä julkisivuja, luoteeseen ja lounaaseen.



Kuva 9. Rakennuksen nykyisiä julkisivuja, kaakkoon ja koilliseen.

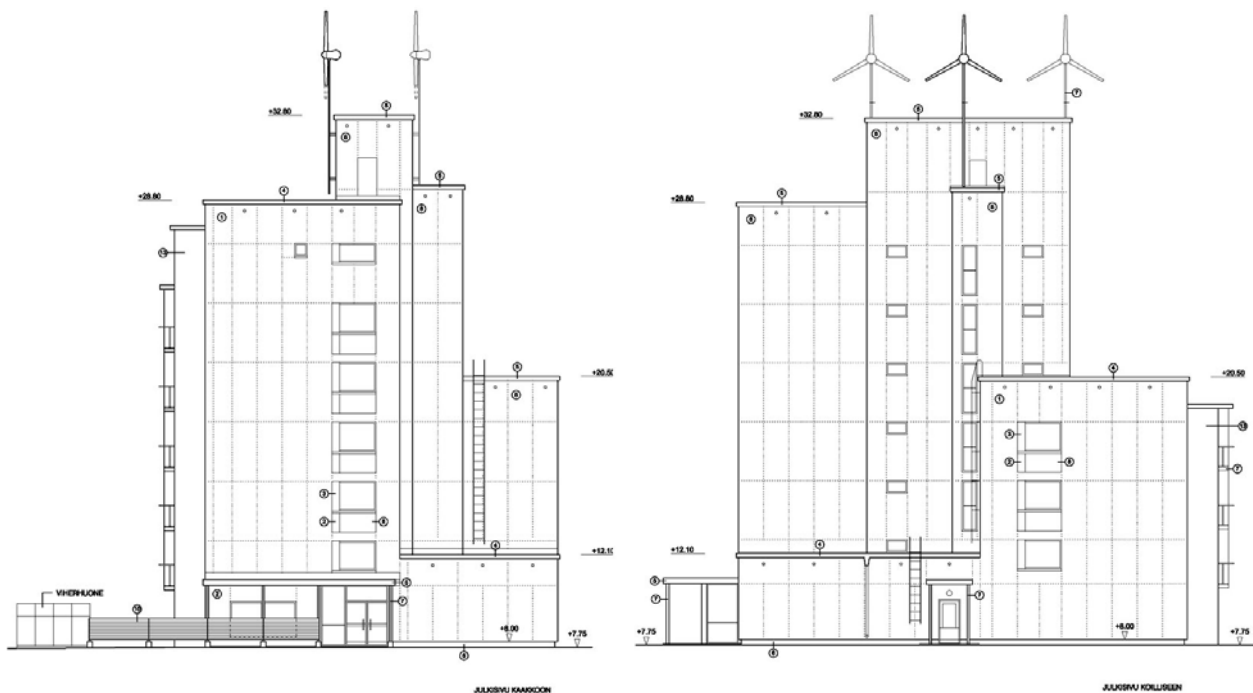


Kuva 10. Julkisivuelementtien purkusuunnitelma.

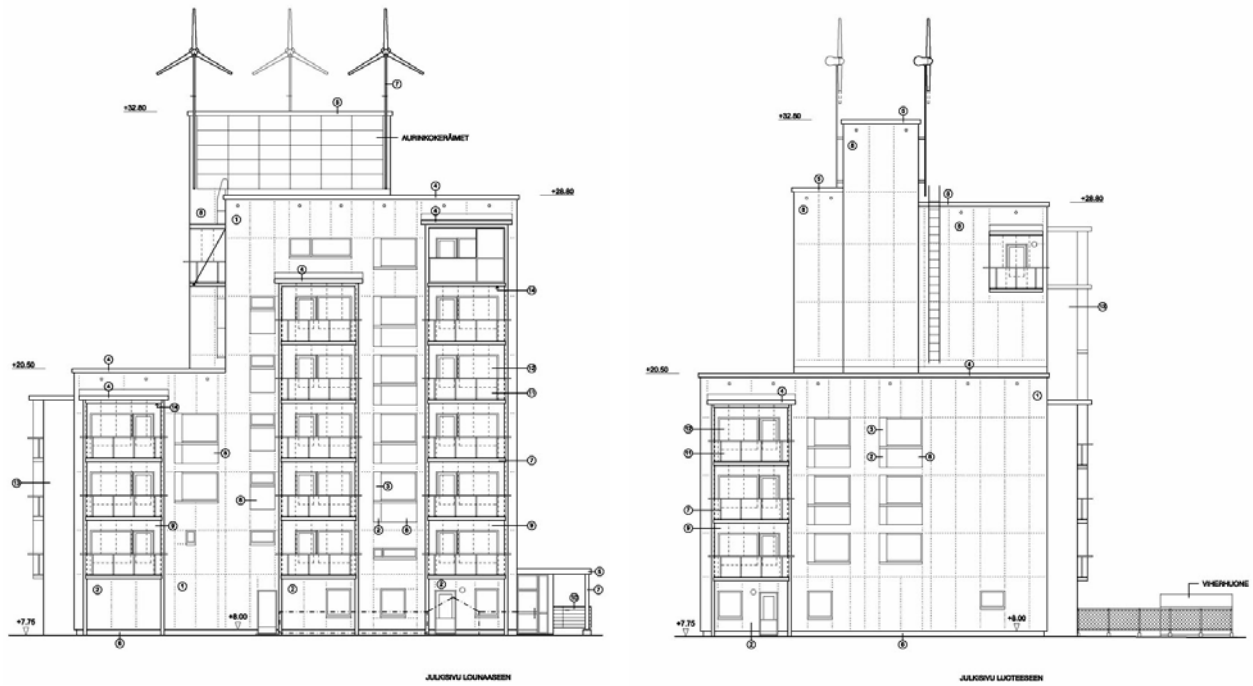
### 3. Yhteenveto

Julkisuudessa käyty keskustelu 1970-80 luvuilla rakennettujen elementtirakennusten korjaamisen järkevyydestä on tervetullut aloite koko lähiökentän viihtyisyys- ja arvokeskustelun kannalta. Ajankohtansa suunnittelutavoitteita ja rakenneteknistä laatutasoa toteuttaneissa aluerakentamiskohteissa on runsaasti puutteita, mikäli niitä verrataan uudistuotantoon. Alueiden kilpailukyky vaativilla asuntomarkkinoilla heikkenee koko ajan.

Nyt on nopeasti kehitettävä koeluonteisia korjausprojekteja, joissa pilottimaisesti tutkitaan korjausmenetelmien rakennustekniikkaa sekä purkamisen ja täydennysrakentamisen malleja. Mikään edellä mainituista ei voi olla se ainoa oikea ratkaisu kaikkialla ja joka paikassa. Asuinalueiden lähtökohdat ovat niin poikkeavia niiden sijainnista ja rakentamisen historiasta johtuen. Valtaosa lähiöistä on kuitenkin jo kolmannenkin sukupolven asuttamia ja omaavat sitä historiallista (lapsuuden) muistumaa, joka on rakennuksia tärkeämpi viihtyisyystekijä. Osassa lähiöitä on menossa ns. takaisinmuuttoaalto. Varsinkin kasvukeskusten lähiöt ovat kehityskelpoisia korjauskohteita myös taloudellisessa mielessä. Laajentunut kaupunkirakenne on usein ”lähentänyt” niiden sijaintia kaupungin keskustan suhteen. Mutta on toki myös toisenlaisia alueita, joista osa on jo nyt ns. saattohoidossa. Näiden korjaamisen raskailla toimenpiteillä voi kyllä kyseenalaistaa.



Kuva 11. Uudistetut julkisivut, kaakkoon ja koilliseen. Kylmään ilmansuuntaan avautuvat julkisivut ovat mahdollisimman umpinaiset ja ne päällystetään tummilla, lasikuituvahvisteisilla polymeeribetonilevyillä.



Kuva 12. Uudistetut julkisivut, luoteeseen ja lounaaseen. Lämpimiin ilmansuuntiin avautuvat julkisivut varustetaan lasitetuilla ja laajennetuilla parvekkeilla sekä varustetaan aurinkokeräimillä. Julkisivulevy on vaalea, LTO-konehuoneen katolla on 3 kpl 2 KW tuuliroottoria.

# Yläpohjaratkaisu matala- ja passiivenergiataloihin

Janne Jormalainen  
SPU Systems Oy

## Tiivistelmä

SPU Passiivikatto on uudenlainen pientalon yläpohjan elementtiratkaisu, joka soveltuu nopeaan rakentamiseen ja erityisesti energiatehokkaiden rakennusten rakenteeksi. Elementti on ns. sandwich-elementti, jossa ytimenä on SPU Eriste ja sen molemmin puolin liimaamalla kiinnitetyt kertopuulevyt ja -jäykisteet. Koska elementti on kauttaaltaan kantava ja helposti työstettävä on yläpohjan suunnitteleminen ja asentaminen hyvin yksinkertaista. Elementti soveltuu käytettäväksi kaikilla kattoratkaisuilla ja kaikkien pintamateriaalien kanssa. Elementtiä käyttämällä saadaan yläpohja asennettua erittäin nopeasti ja edullisesti.

## 1. Johdanto

Noin kaksi kolmasosaa Suomessa vuosittain rakennettavista uudispientaloista tehdään teollisesti valmistettavista seinäelementeistä. Kuitenkin on erittäin harvinaista, että myös talon yläpohja rakennettaisiin elementeistä. Usein talon seinäelementit pystytään asentamaan päivässä tai kahdessa mutta yläpohjan tekeminen työmaalla kestää pitkään, jopa yli kuukauden. Tämä on suuri ongelma varsinkin talvirakentamisessa. Erilaisia pientalon kattoelementtiratkaisuja on ollut vuosien varrella monenlaisia, mutta suunnittelun ja valmistuksen monimutkaisuus on ollut este niiden yleistymiselle.

Energiatehokas rakentaminen on lisännyt yläpohjarakenteille kohdistettuja vaatimuksia. Vanhoilla eristeratkaisuilla matala- ja passiivirakentamisen vaatimukset täyttäviin U-arvoihin pääseminen edellyttää erittäin paksuja rakenteita, mikä johtaa rakennusteknisesti ja rakennusfysikaalisesti monimutkaisuuteen ja arveluttaviin rakenteisiin. Markkinoilla on siis tarve nopeasti asennettavalle ja yksinkertaiselle yläpohjan elementtiratkaisulle.

## 2. SPU Passiivikatto® -elementin periaate



Kuva 1. SPU Passiivikatto –elementti odottamassa kuljetusta.

SPU Passiivikattoelementissä koko kattorakenne sisältyy valmiisiin elementteihin lukuun ottamatta ala- ja yläpuolisia pintarakenteita. Kyseessä on ns. sandwich-elementti, jossa SPU-eristelevyyn on kiinnitetty molemmin puolin kertopuulevy, sekä tuuletus- ja asennustilan koolaukset. Elementeissä ei tarvita erillistä tuulensuojaa tai höyrünsulkua. Myös räystäsratkaisu on mukana elementin rakenteessa. Elementti toimii yksi- tai useampiaukkoisena kantavana rakenteena. Elementtien työstäminen on helppoa; läpiviennit (kuten aukko IV-putkille) voidaan tehdä työmaalla lähes mihin kohtaan tahansa helpottaen siten elementtien suunnittelua. SPU Passiivikattoelementit säästävät nopean asennuksen ja rakenteensa vuoksi merkittävästi aikaa ja kustannuksia; pientalon katto on mahdollista saada vesikatetta ja sisäverhousta vaille valmiiksi jopa yhdessä päivässä. Nopeudesta on hyötyä esimerkiksi talvirakentamisessa, sillä rakennuksen lämmityksen voi kytkeä päälle jo katon asennuspäivänä.

SPU Passiivikatto on erityisesti passiivi- ja matalaenergiatalojen rakentamiseen tarkoitettu kattoelementti. SPU Passiivikatto on myös rakenteeltaan ohut verrattuna muihin passiiviratkaisuihin. Polyuretaanieristeen ominaisuuksien ja tiivistysmenetelmien ansiosta rakenne on sekä ilma- että vesihöyrytiivis, mikä takaa kosteusteknisen toimivuuden juuri rakennuksen yläosissa, jotka ovat tyypillisesti ylipaineisia. Tunnetusti polyuretaanieristeisten rakennusten ilmatiiviysluvut ovat aina alle 1 l/h. Lisäksi rakenne on kylmäsillaton. [1]

SPU Passiivikattoelementtiä voidaan käyttää kaikenlaisissa kattotyypeissä, mutta etenkin harja- ja pulpettikatot soveltuvat helposti rakennettaviksi elementtejä käyttäen. Kattokaltevuus ei aseta mitään rajoitteita elementin käytölle, kuten ei myöskään arkkitehtisuunnittelussa valitut pintamateriaalit.

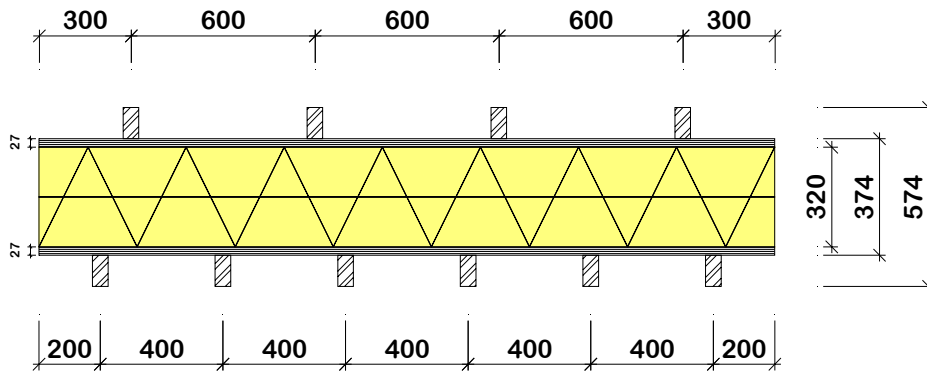
### 3. Elementin rakenne

Elementtiä valmistetaan kahdella eri eristepaksuudella ja eristeenä käytetään SPU AL eristettä: Matalaenergieelementin U-arvo on  $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja sen eristepaksuus on 240 mm.

Passiivienegeriarakentamiseen tarkoitettun elementin U-arvo on  $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja eristepaksuus 320 mm. Molemmat elementit soveltuvat sellaisenaan vuoden 2010 lämmöneristemääräysten mukaiseen rakentamiseen, jossa lämpimän tilan yläpohjalle on asetettu U-arvovaatimus  $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [2]

Elementti koostuu ylä- ja alaripalaatoista, joiden väliin on asennettu haluttu määrä SPU eristettä. Ripalaattoihin on kiinnitetty jäykisteet. Elementtien kaikki osat on kiinnitetty toisiinsa yksikomponenttisella polyuretaanihiimalla. Vakioelementin ripalaatoissa eristettä vasten on 27 mm paksu Kerto-Q-LVL levy, jonka ulkopintaan on liimattu 51 mm x 100 mm kokoiset elementin pituussuuntaiset Kerto-S-LVL jäykisterimat. Perustapauksessa yläripalaatassa on 4 jäykistettä ja alaripalaatassa 6 jäykistettä (kuva 2).





Kuva 2. SPU Passiivikattoelementin poikkileikkaus.

## 4. Rakennesuunnittelu

Peruselementin leveys on 2400 mm ja sovite-elementin leveys valmistetaan elementtisuunnitelman mukaan. Elementin pituus on aina kohdekohtainen.

Peruseriaate rakennesuunnittelussa on, että elementti tuetaan seinän ja/tai ”kurkihirren” varaan. SPU Passiivikattoelementtien kantavuuden mitoitus voidaan tehdä mitoitustaulukoiden pohjalta [3]. Peruselementin maksimi jänneväli on noin 7 m tasakatolla. Ylä- ja alatilajäykisteiden korkeutta muuttamalla voidaan maksimijänneväliä edelleen nostaa.

Pienemmät aukot ilmastointi- ja muille putkille voidaan tehdä työmaalla ilman etukäteissuunnittelua. Suuret aukot kuten hormien läpiviennit tulee suunnitella etukäteen rakennesuunnittelun yhteydessä.

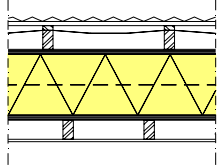
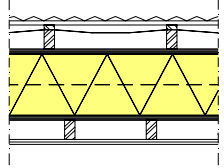
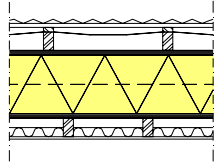
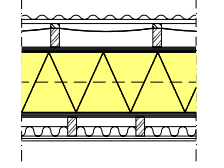
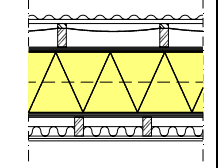
### 4.1 Ääneneristysominaisuudet

Jos kaavamääräykset asettavat vaatimuksia rakennuksen vaipan ääneneristykselle, tai erityisellä melualueella halutaan tavallista paremmin ääneneristetty rakenne, voidaan SPU Passiivikattoelementin ääneneristävyttä helposti lisätä esimerkiksi käyttämällä kaksinkertaista kipsilevyä sisäpinnassa.[4]. Taulukossa 1 on listattu SPU Passiivikattoelementin ääneneristysominaisuudet ja esimerkkirakenteita melualueille rakennettaessa.

Taulukko1. SPU Passiivikattoelementin ääneneristysominaisuudet ja esimerkkirakenteet melualueille rakennettaessa.

Sisäpinta	Ääneneristävyys (dB)		
	$R_w$	$R_w+C$	$R_w+C_{tr}$
1. 1-kertainen kipsilevy (N)	44	40	35
2. 2-kertainen kipsilevy (N)	49	46	41
3. 1-kertainen kipsilevy (N)+ 50 mm mineraalivilla ripojen välissä	49	46	41
4. 2-kertainen kipsilevy (N)+ 50 mm mineraalivilla ripojen välissä	54	52	47
5. 2-kertainen kipsilevy (EK) + 50 mm mineraalivilla ripojen välissä	55	53	48

Rakenne 1	Rakenne 2	Rakenne 3	Rakenne 4	Rakenne 5
				

## 5. Asennus



Kuva 3. SPU Passiivikattoelementtiä asennetaan betonirunkoiseen pientaloon.

SPU Passiivikattoelementin asennus on erittäin nopeaa. Kuva 3. Keskimääräisen pientalon kattoelementit saadaan asennettua muutamassa tunnissa. Elementtien kiinnittämiseen runkoon käytetään yksinkertaisesti kulmarautoja. Elementit ovat keveitä noin 500 kg / elementti, joten asennustyöhön riittää jopa kevyt Hiab-nosturi. Elementtien saumat vaahdotetaan polyuretaani saumavaahdolla, jolloin rakenteesta saadaan täysin ilmatiivis. Myös läpiviennit tiivistetään saumavaahdolla ilmatiiveyden varmistamiseksi. Ala- ja yläpuolen pintamateriaalit voidaan kiinnittää suoraan kertopuujäykisteisiin.

## 6. Yhteenveto

SPU Passiivikatto on nopea ja tehokas vaihtoehto energiatehokkaiden pientalojen yläpohjaratkaisuksi. Käyttämällä elementissä SPU Eristettä, elementistä on saatu ohut mutta erittäin hyvin lämpöä eristävä. Elementin täysin kylmäsillaton rakenne, sekä täydellinen ilmanpitävyys ovat tärkeitä matala- ja passiivienergiarakentamisessa. Talvirakentamisessa elementtiä käyttämällä on rakennukseen mahdollista kytkeä lämmitys päälle asennuspäivänä. Asennuksen nopeus tuo myös merkittäviä kustannussäästöjä työmaalla.

## Lähdeluettelo

- [1] SPU Passiivikatto suunnitteluohje, 1-09, SPU Systems Oy, 2009.
- [2] Suomen rakentamismääräyskokoelma C3, Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010, Ympäristöministeriö 2008.
- [3] Lausunto NRO VTT-S-04005-09. SPU pientalon kattoelementin mitoitusperusteet. VTT 2008.
- [4] SPU-rakenteilta vaadittava ilmaääneneristävyys melualueille rakennettaessa. Helimäki raportti 3676-4, 2008. 4 sivua + 98 liitesivua.



# Paroc – passiivitaloprojekti

Pekka Haikonen  
Paroc Oy Ab

## Tiivistelmä

Rakennukset ovat Euroopassa suurin energian kuluttaja. Ne kuluttavat 40 prosenttia kaikesta loppuenergiasta – kaksi kertaa sen, minkä liikenne kuluttaa. Onkin selvää, että rakennusten energiatehokkuutta parantaviin ratkaisuihin kohdistetaan suuria odotuksia. Samalla kun passiivitalo säästää energiaa ja kustannuksia, jättää se merkittävän osan energian tuotannosta aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä syntymättä.

Passiivitaloprojekti kohdistettiin koskemaan Pohjoismaiden ja Baltian markkinoita ja se rajattiin pientalorakentamiseen. Projekti jaettiin neljään osakokonaisuuteen:

1. konseptin kehittäminen
2. koerakentaminen
3. seuranta
4. sertifiointi

Tässä käsitellään kolmea ensimmäistä. Alla esitellään projektista saadut alustavat tulokset passiivirakentamisen suunnittelusta, toteutuksesta, kustannustehokkuudesta ja ympäristövaikutuksista. Mittaustulokset tullaan raportoimaan erikseen niiden valmistuttua kahden vuoden kuluessa.

## 1. Johdanto

Projekti aloitettiin vuonna 2007 ja se saatetaan loppuun vuoden 2009 kuluessa. Se toteutettiin yhteistyössä VTT:n kanssa ja sen rahoitukseen on saatu avustusta Teknologian tutkimuskeskus Tekesiltä. Mukaan verkottui joukko yhteistyökumppaneita rakentamisen eri osaamisalueilta.

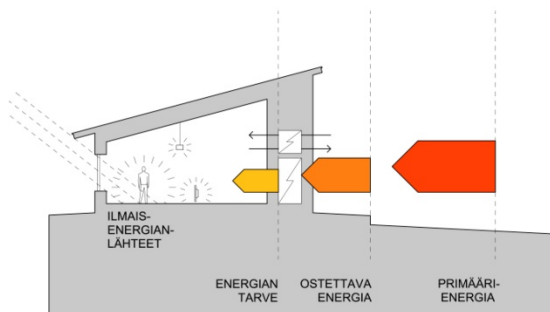
## 2. Projektin kuvaus

Tavoitteeksi asetettiin kehittää energiatehokkaalle rakentamiselle ratkaisuja, jotka palvelevat rakentajia kustannustehokkaasti asumisen mukavuudesta ja terveellisyydestä tinkimättä. Projektissa pyritään löytämään energiatehokkuuden ja rakentamiskustannusten näkökulmasta ”optimirakenteet”, jotka mahdollistavat jatkossa myös siirtymisen nolla- tai plusenergiatalojen rakentamiseen.

### 2.1 Konseptin kehittäminen

Konseptin kehittämisessä asetettiin tavoitteeksi määrittää passiivitalolle asetettavat energiatehokkuuteen vaikuttavat kriteerit. Lähtökohdaksi otettiin saksalaisen Passivhausinstitut -laitoksen kehittämä määritelmä, jonka VTT mukautti pohjoismaiseen ilmastoon sopivaksi. Periaatteena oli, että tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen energian tarpeelle asetetut kriteerit

sopeutetaan ilmastoon siten, että kehitettävät rakennusratkaisut täyttävät asetetut kriteerit Pohjois-Euroopassa maantieteellisestä sijainnista riippumatta. Katsottiin, että näin menetellen konsepti antaa pohjan kaupallisesti järkevälle toiminnalle [1].



- Lämmitysjärjestelmä ei vaikuta lämmitysenergiatarpeeseen
- Ilmaislämmönlähteet, ulkovaipan ominaisuudet ja lämmön talteenoton hyötysuhde vaikuttavat lämmitysenergiatarpeeseen
- Ostettavaan energiaan vaikuttaa lisäksi lämmitysjärjestelmän hyötysuhde

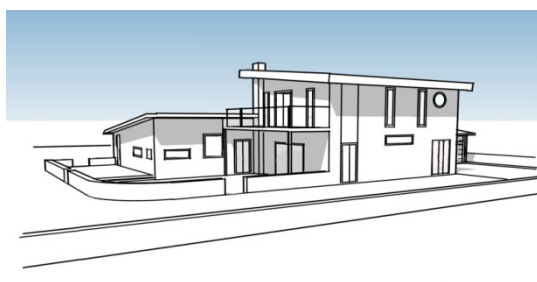
Kuva 1. Tilojen lämmitysenergian tarve.

## 2.2 Koerakentaminen

Koerakentamista varten valittiin neljä seurantakohtetta Suomesta, Ruotsista ja Liettuasta. Kohteet pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustavat rakenteiltaan erityyppisiä ratkaisuja ja rakennuttajat siten, että kohteita voidaan esitellä mahdollisimman vapaasti sekä paikan päällä että mediassa.

### 2.2.1 Paroc Granbäck, Tukholma

Seurantakohte on puurankarakenteinen omakotitalo, joka valmistui tammikuussa 2008. Rakennus on osittain kaksikerroksinen ja se edustaa perinteistä paikalla rakentamista. Rakennuksessa on ilmanvaihtolämmitykseen perustuva lämmönjako ja tehokas lämmön talteenotto. Talossa on myös aurinkokerääjät lämpimän käyttöveden tuottamista varten. Laskettu lämmitysenergian tarve on 15 kWh/m<sup>2</sup> vuosi. Talo on esitelty laajasti ruotsalaisessa ja kansainvälisessä lehdistössä sekä sähköisessä mediassa [2].



Rakenne	Eristys, mm	U-arvo W/mK
Alapohja	300	0,10
Ulkoseinä	455	0,09
Yläpohja	570	0,068

Kuva 2. Omakotitalo Paroc Granbäck.

### 2.2.2 Paroc Passiivitalo, Vantaa

Seurantakohte on betonirunkoinen paritalo, joka valmistui kesäkuussa 2009. Siinä on PreWIS – järjestelmään perustuvat ulkoseinät ja puurakenteinen yläpohja. Sen laskettu lämmitysenergian tarve on 18 kWh/m<sup>2</sup> vuosi. Rakennuksessa on ilmavaihtolämmitykseen perustuva lämmönjako ja lämmön talteenotto. Paritalon toisella puolella talteenotto perustuu levymäiseen talteenottokennoon ja toisella puolella pyörivään kennoon. Lisäksi järjestelmässä hyödynnetään maapiirissä kierrätettävään nesteeseen, jonka avulla kennojen jäätymistä voidaan vähentää ja talteenoton hyötysuhdetta nostaa. Vuosihyötysuhteeksi on arvioitu 87 %. Talo on esitelty laajasti Suomen lehdistössä ja sähköisessä mediassa [3].



Kuva 17. Passiivitalon julkisivuvuorat, leikkaus ja pohjapiirroksiset.

Kuva 3. Paritalo Paroc Passiivitalo.

Rakenne	Eristys, mm	U-arvo W/mK
Alapohja	300	0,10
Ulkoseinä	430	0,09
Yläpohja	700	0,07

### 2.2.3 Paroc Lupaus, Valkeakoski

Seurantakohde on puurankarakenteinen omakotitalo, joka valmistui heinäkuussa 2009 Valkeakosken asuntomessuille. Sen laskettu lämmitysenergian tarve on 23,8 kWh/m<sup>2</sup> vuosi. Rakennuksessa on ilmanvaihtolämmitykseen perustuva lämmönjako sekä pyörivään kennoon perustuva ilmanvaihdon lämmön talteenotto, johon on lisäksi integroitu poistoilmalämpöpumppu käyttöveden lämmittämistä varten [4].



Kuva 4. Omakotitalo Paroc Lupaus.

Rakenne	Eristys, mm	U-arvo W/mK
Alapohja	420	0,07
Ulkoseinä	480	0,086
Yläpohja	650	0,063

### 2.2.4 Paroc Green Hills, Vilna



Kuva 5. Omakotitalo Paroc Green Hills - seurantakohde on tätä artikkelia kirjoitettaessa edelleen rakenteilla.

Rakenne	Eristys, mm	U-arvo W/mK
Alapohja	400	0,10
Ulkoseinä	350	0,12
Yläpohja	500	0,08

## 2.3 Seuranta

Paroc Passiivitaloon ja Paroc Lupaukseen asennetaan VTT:n toimesta seurantalaitteet, joiden avulla voidaan seurata rakennusten energiankulutusta, lämpötiloja ja kosteutta. Energian kulutuksen seuranta tapahtuu verkossa reaaliaikaisesti. Rakennuksen sähköjärjestelmä on jaettu kymmeneen piiriin, joita voidaan seurata toisistaan riippumatta. Lämpötilojen ja kosteuden seuranta tapahtuu tiloihin asennettujen mittalaitteiden avulla, joiden tietosisältö siirretään tietojärjestelmään määräväleihin. Tulokset tullaan raportoimaan energiaviisastalo – verkkosivuilla. Paroc Granbäck - seurantakohteessa energiankulutusta tullaan mittaamaan reaaliaikaisesti Yello Strom – järjestelmän avulla ja tulokset raportoidaan verkossa sekä muun muassa Twitterissä.

## 3. Projektin tulokset

### 3.1 Suunnitteluaineisto

Projektin tuloksena syntyi laajahko suunnitteluaineisto. Aineistossa on yläpohjan, ulkoseinän ja alapohjan rakenneratkaisuja erityyppisiin rakennuksiin sekä yksityiskohtia rakenteiden liitoksiin. Detaljien suunnittelussa on kiinnitetty huomiota hyvään ilmatiiveyteen ja sen aikaansaamiseen työmaaolosuhteissa. Toimivan ratkaisun löytyminen vaati joissakin tapauksissa useamman suunnittelukierroksen ja kokeilun työmaalla. Aineisto löytyy verkosta ja on vapaasti kaikkien käytettävissä. Projektissa kehitettiin myös passiivitalolaskuri, jonka avulla rakennuttaja voi arvioida karkeasti passiivitalon kustannustehokkuutta rakennuksen elinkaaren aikana standarditaloon verrattuna [5].

### 3.2 Rakennusfysikaalinen toiminta

Hyvin eristettyjen ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta Suomen ilmastossa haluttiin varmistaa analysoimalla homeriskiä. VTT:n tekemien selvitysten perusteella voidaan todeta, ettei riskiä ole. Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa homeindeksi oli olemattoman pieni [6].

### 3.3 Energian säästö

Koerakennuskohteet mallinnettiin ja niiden energiatehokkuus simuloitiin dynaamisella laskentaohjelmalla. Alla olevassa taulukossa Paroc Passiivitalon simuloitua energiankulutusta on verrattu standarditalon energiankulutukseen ja sen perusteella laskettu elinkaaren aikana syntyvät säästöt. Säästöjä ei ole diskontattu, koska ajatellaan, että energian hinta seuraa vähintään yleistä inflaatiiovauhtia ja todennäköistä on, että sen hintakehitys on inflaatiota nopeampi. Lämmitysenergian hinnaksi on oletettu 0,09 €/kWh.

Taulukko 1. Paroc Passiivitalon laskettu lämmitysenergian tarve.

	Paroc Passiivitalo	Standarditalo
Lämmitysenergian tarve 50 vuodessa, kWh	336.500	2.244.000
Lämmitysenergian säästö, 50 vuodessa, kWh	1.907.500	
Lämmityskustannusten säästö 50 vuodessa, €	171.675	

### 3.4 CO<sub>2</sub> – päästöt

Samoin analysoitiin Paroc Passiivitalon hiilidioksidipäästöt käyttäen lähtökohtana Vantaan energian tämänhetkistä sähköntuotannon rakennetta. Kuten alla olevasta taulukosta voidaan havaita, Passiivitalon lämmityksestä aiheutuvat CO<sub>2</sub> – päästöt ovat 85 % alhaisemmat kuin



standarditalon lämmityksestä aiheutuvat päästöt. Paroc Passiivitaloon käytetyn lisälämmöneristyksen valmistuksessa syntyneet CO<sub>2</sub> – päästöt säästävät talon käytön aikana alle vuodessa. Syntymättä jäänyt hiilidioksidipäästö vastaa 2,7 miljoonan kilometrin ajoa autolla eli 160 vuoden keskimääräistä autoilua.

Taulukko 2. Paroc Passiivitalon lämmityksestä syntyvä CO<sub>2</sub> – päästö.

	Paroc Passiivitalo	Standarditalo
CO <sub>2</sub> – päästöt lämmitysenergian tuottamisesta 50 v, kg	96.946	646.496
CO <sub>2</sub> – päästöjen säästö 50 vuodessa, kg	549.550	

### 3.5 Mittaustulokset

Kaikissa koerakennuskohteissa tehtiin rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveyden koestukset painekokeen avulla. Tulokset vaihtelivat välillä 0,20 – 0,35 1/h, ja olivat siis selvästi parempia kuin passiivitalolle asetettu vaatimus 0,60 1/h. Varsinainen mittauksiin perustuva seuranta on vasta käynnistymässä ja tulosten aikaansaaminen kestää vähintään kaksi vuotta seurannan aloittamisesta.

### 3.6 Kustannukset

Paroc Passiivitalo seurantakohteesta on tehty kustannusanalyysi, joka osoittaa, että passiivitalon rakennuskustannukset olivat 5,0 % korkeammat kuin standarditalon ja rakennushankkeen kokonaiskustannukset tonttikustannus mukaan luettuna 3,6 % korkeammat kuin standarditalossa.

Taulukko 3. Paroc Passiivitalon kustannukset standarditaloon verrattuina.

	€	€/m <sup>2</sup>	%
Rakentamisen lisäkustannus	28.100	75	5,0
Koko hankkeen lisäkustannus	31.600	85	3,6
Säästöt lämmityskuluissa 50 vuoden aikana	171.675	459	
Kokonaissäästö	140.075	374	
Takaisinmaksuaika, vuotta	9,2		

### 3.7 Havainnot

Voidaan todeta, että passiivirakentamisessa rakentamiskustannukset ovat vain marginaalisesti korkeammat kuin normaalirakentamisessa. Samoin voitiin havaita rakenteiden ulkovaipan ilmatiiveyden erittäin hyvä taso. Hyvä tiiveys ja passiivitalon lämmöneristystaso yhdessä parantavat myös ääneneristävyyttä - kun ikkunat suljetaan, ei ulkopuolelta kantaudu sisään ääniä.

Alustavat havainnot viittaavat siihen, ettei kesäaikainen yllämpö ole Suomen ilmastossa ongelma. Valkeakosken asunomessujen aikaan sattuneen hellejakson aikana Paroc Lupauksen sisälämpötila pysyi mukavuustasolla ilman erillistä jäähdytystä. Vaipan hyvä eristävyys estää tehokkaasti auringon säteilylämmön siirtymisen sisään.

Passiivitaloista keskusteltaessa esiin tuodaan usein kysymys ”ylipaksuista” eristeistä ongelmana. Koerakennuskohteista saadun palautteen perusteella ei paksuja seinärakenteita käytännössä koeta ongelmaksi, vaan päinvastoin esille on tuotu kommentteja vanhanajan ikkunalaudoista positiivisena elementtinä nykyajan rakentamiseen.

#### 4. Yhteenveto

Projektissa on kehitetty passiivitalokonsepti, joka mahdollistaa passiivitalojen rakentamisen Pohjois-Euroopan ilmastossa. Konsepti on avoin erilaisille arkkitehtonisille ratkaisuille eikä rajoita käytettävien rakennusmateriaalien valintaa. Tilasuunnittelussa on otettava kuitenkin huomioon talotekniikan sijoittelu mahdollisimman keskeisesti siten, että ilmahormien sijoittelu voidaan toteuttaa mahdollisimman yksinkertaisesti.

Ylilämmön hallinta ei vaikuta muodostuvan ongelmaksi pohjoismaisessa passiivirakentamisessa. Rakennuksen sijoittelu tontille on suhteellisen vapaata, hyvänä esimerkkinä Paroc Lupaus, joka avautuu pääsuuntanaan pohjoinen [8]. Lattioiden mukavuuslämmitys saniteetitiloissa ei muodosta ongelmaa kunhan pintalämpötila pidetään kohtuullisena. Sen sijaan suurien lattiapintojen lämmittämistä olisi pyrittävä välttämään. Tulisija, kuten avotakka, tulisi mitoittaa riittävän massiiviseksi siten, että se varaa lämpöä ja luovuttaa sen hitaasti huonetilaan.

Projektissa käytetyillä ilmanvaihtolaitteistoilla saavutetaan korkea lämmön talteenoton vuosihyötysuhde. Sekä tasokerääjiin että pyörivään kennoon perustuvilla järjestelmillä saavutetaan yli 75 % vuosihyötysuhde. Tässä auttaa osaltaan maalämmön hyödyntämiseen perustuva sisään puhallettavan ilman esilämmitys, joka vähentää kennon jäätymistä.

On tuotettu pientalorakenteiden suunnitteluratkaisut, vaipan ilmatiiveyden edellyttämät liitosdetaljit sekä passiivitalolaskuri rakennuttajan päätöksenteon helpottamiseksi. Mittauksilla on myös voitu todentaa vaipan erittäin hyvä ilmatiiveys.

Projektin neljännessä osiossa tullaan kehittämään sertifiointijärjestelmä, jonka tavoitteena on varmistaa passiivirakentamisessa käytettävien suunnitteluratkaisujen, laskentamenetelmien, materiaalien ja työsuorituksen laatu.

#### Lähdeluettelo

- [1] [www.passiivi.info](http://www.passiivi.info)
- [2] Jyri Nieminen, Riikka Holopainen, Ilpo Kouhia: Paroc Passive House for Nordic and Baltic Housing Markets, VTT
- [3] [www.granback.se](http://www.granback.se)
- [4] [www.paroc.fi](http://www.paroc.fi)
- [5] [www.energiaviisastalo.fi](http://www.energiaviisastalo.fi)
- [6] Finnmap Consulting Oy
- [7] Jyri Nieminen: Passiivirakentaminen, Paroc Passiivitalo & Paroc Lupaus, VTT. Ammattilaisseminaari 11.3.2009 Tampere
- [8] Kimmo Lylykangas, Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas

# Korjaamalla passiivitalostandardiin

Ruut Peuhkuri ja Søren Pedersen  
Passiivitalo.fi Oy / Passivhus.dk ApS

## Tiivistelmä

Tässä artikkelissa käydään läpi esimerkinomaisesti muutaman keskieurooppalaisen korjaushankkeen ratkaisut ja niiden tuomat kokemukset. Pääpaino on kerrostalokohteilla. Tarkoituksena on tuoda kokemusmaailmaa lähemmäksi suomalaista suunnittelijaa sekä inspiroida samalla rakennusten käyttäjiä ja omistajia vaatimaan kauaskantoisia ratkaisuja.

## 1. Johdanto

Olemassa olevan rakennuskannan parantaminen on yksi ajankohtaisimmista rakennusalan haasteista rakennusten estetiikan ja erityisesti käyttöiän pidentämisen vuoksi. Tällä hetkellä vallitsevan taloudellisen taantuman ja siitä johtuvan uudisrakentamisen nopean hiipumisen takia on rakennusteollisuuden kiinnostus korjausrakentamiseen kasvanut huomattavasti. Suomessa korjausrakentaminen onkin pitkään ollut hyvin vähäistä ja remontteihin käytetyt summat per neliö huomattavasti pienempiä kuin monissa EU-maissa [1].

Rakennusten energiatehokkuutta parannetaan yleensä kaikkien ulkovaipankorjausten yhteydessä. Elinkaarikustannukset sanelevat kuitenkin usein, miten paljon energiatehokkuutta kannattaa parantaa yleiskunnostuksen yhteydessä. Siksi lämmöneristystä lisätään usein kestäväen kehityksen näkökulmasta turhan maltillisesti: nyt tehtävä pienehkö lisäeristys tulee vähentämään suuremman, tulevaisuuden vaatimukset täyttävän eristepaksuuden kannattavuutta.

Suomessa on jo muutamia esimerkkejä kohteista, joissa rakennusten energiatehokkuutta on parannettu huomattavasti. Useimmiten korjausrakentamisen volyymi Suomessa kuitenkin painottuu putkiremonttiin ja siihen liittyvään saneeraukseen, kun taas Keski-Euroopassa putkiremontin yhteydessä puututaan myös ulkovaippaan ja ilmanvaihdon koneellistamiseen lämmöntalteenoton kera. Vanhoja rakennuksia voidaan kunnostaa siis niin pitkälle, että ne täyttävät matalaenergia- tai jopa passiivitalon kriteerit.

## 2. Energiasaneerausesimerkkejä

Saksassa ja Itävallassa on käytössä useita ”standardeja”, kun puhutaan vanhojen rakennusten energiasaneerauksista ja siitä, mihin energiansäästötavoitteeseen tähdätään ja/tai on päästy. On 3 ja 4 litran taloja, KfW-40 –taloja sekä niin sanottuja Faktor 10 –taloja. Faktor 10 tarkoittaa esimerkiksi sitä, että rakennusten lämmöntarvetta on vähennetty 90 prosentilla eli kymmenesosaan alkuperäisestä. Passiivitalon kriteerit – lämmitysenergian tarve  $< 15 \text{ kWh/m}^2/\text{v}$  – täyttäviä kohteita on toki rajoitetusti remonttikohteissa, mutta yleensä nämä muutkin energiansäästötavoitteissa pitkälleviedyt kohteet on saneerattu samoilla periaatteilla ja komponenteilla kuin passiivitalostandardiin pyrkivässä uudisrakennuksessa tulisi tehdä. Mainittakoon vielä, että uudisrakentamisesta ja passiivitalokriteerien tarkasta täyttämisestä poiketen puhutaan keskieurooppalaisen korjausrakentamisen yhteydessä ”passiivitaloista”, jos

korjaukseen on käytetty passiivitaloon hyväksytyjä komponentteja ja ratkaisuja ja lämmöntarve jää alle noin 25 kWh/m<sup>2</sup>/vuosi.

Seuraavassa on esimerkinomaisesti otettu muutamia tyypillisiä kohteita ja niissä käytettyjä ratkaisuja. Näistä saa hyvän kuvan saneerauksen laajuudesta ja yksityiskohtien tärkeydestä niissä asioissa, mitkä ovat tarpeellisia lämmöntarpeen huomattavaksi vähentämiseksi. Esimerkit on valittu sitä silmällä pitäen, että ratkaisut voisivat toimia myös Suomessa. On muistettava, että ilmoitetut laskennalliset ja mitatut ominaislämmöntarpeet sekä kulutukset koskevat lauhempaa ilmastoja kuin Suomessa. Siksi ominaislämmöntarve samoilla ratkaisuilla ja samankokoisessa kohteessa tulee olemaan suhteellisesti korkeampi Suomessa. Kohteiden esittelyn yhteydessä on mainittu projektivastuussa olleita tahoja. Niiden yhteystiedot löytyvät lähdeluettelosta, mikä helpottaa lisätietojen hankkimista.

## 2.1 Asuinkerrostaloja

Ingolstädter Straße 139/141 Nürnbergissä on tyypillinen 50-luvun kerrostalo, joka saneerattiin vuonna 2004 ”4 litran” taloksi, Kuva 1a. Kohteen tarkoituksena oli havainnollistaa ne lisäkustannukset, jotka oletusten mukaan syntyvät, kun tähdätään suurempaan energiansäästöön kuin saksalaisen normisaneerauksen mukaan. Saksassa energiankulutus ja yksittäiset U-arvot saavat olla korkeintaan 40 prosenttia korkeammat kuin rakennusmääräysten mukaan uudisrakennuksilta vaaditut (EnEV-järjestelmä). Tässä kohteessa lisäkustannus oli reilu 120 €/asuin-m<sup>2</sup>. Korjauskohteen arkkitehtinä toimi Schulze Darup & Partner, joka myös vastasi energiakonseptista [2].

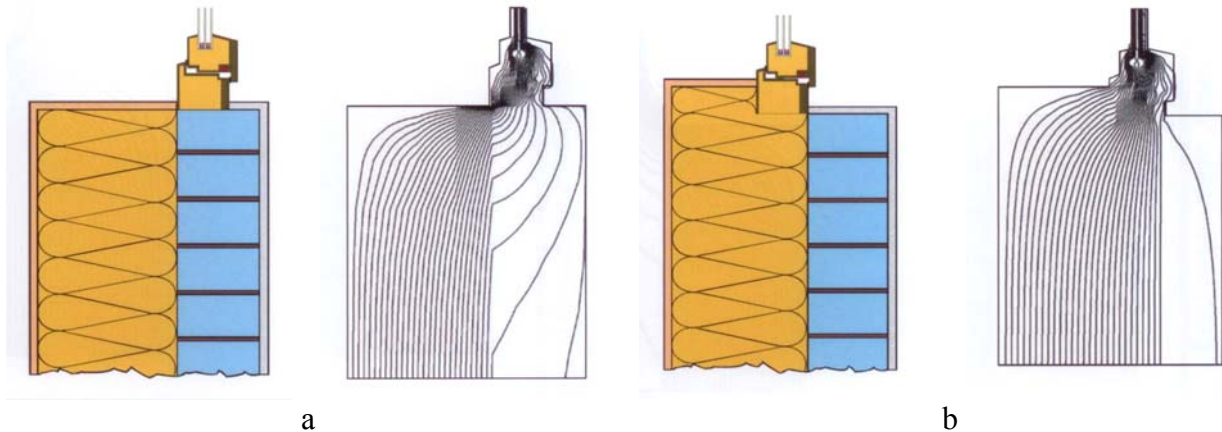


Kuva 1. Ingolstädter Straße 139/141. a) Yleiskuva 3 kerroksisesta, 1951 rakennetusta ja 2004 saneeratusta asuinkerrostalosta Nürnbergissä. b) Uusien ikkunoiden asennusdetalji. [2]

Rakennuksessa on 12 asuntoa ja sen tilavuus on 3321 m<sup>3</sup>. Ulkoseinät eristettiin eristerappauksella, jossa on 200mm neoporia (”harmaata” EPS:ää), minkä ansiosta ulkoseinän U-arvo on 0,15 W/m<sup>2</sup>K. Yläpohjassa eristettä on 250mm ja alapohjassa (välipohja kellariin) 200mm. Ulkovaipan alkuperäiset ja uudet lämmönläpäisykertoimet löytyvät taulukosta 1. Alkuperäinen ja remontin jälkeinen lämmöntarve sekä laskennallisena että mitattuna näkyy Kuva 3:sta. On huomattava suomalaisiin oloihin verratessa, että monesti saneerattavissa keskieuropalaisissa kohteissa ei ole alun perin käytetty mitään eristeitä ja siten prosentuaalinen säästö on yleensä aina hyvin huomattava.

Uudet energiaikkunat asennettiin vanhan julkisivun ulkopuolelle, jotta ikkuna olisi uuden eristekerroksen tasossa. Ikkunan kiinnityssystemi ja tulevan eristekerroksen paksuus näkyvät kuvassa 1b.

Tämä isotermien ”oikistaminen” on yksi rakennusfysiikan lainalaisuuksista lämpövirrantiheyden vähentämiseksi ja siten energiatehokkaan rakentamisen periaatteista, kun ulkovaipan kylmäsiltoja pyritään minimoimaan. Kuva 2 näyttää ikkunan eristekerroksen jatkeeksi sijoittamisen tärkeyden periaatteellisesti: vaihtoehto A:n ikkunan tehollinen U-arvo on  $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , kun saman ikkunan asentaminen ilman kylmäsiltaa eli vaihtoehto B:n mukaan antaa teholliseksi U-arvoksi  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

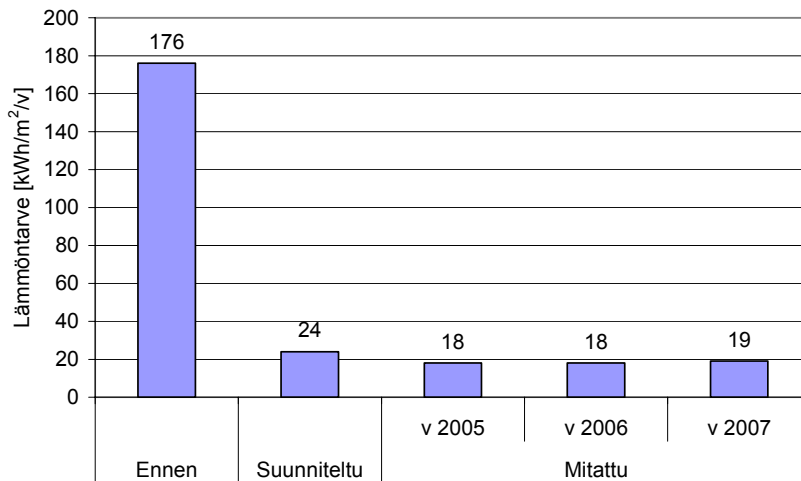


Kuva 2. Ikkunan asennuksen vaikutus kylmäsiltojen suuruuteen. a) Asennus epäoptimaalinen. b) Asennus lämpöteknisesti paljon parempi. Grafiikka lähteestä [13].

Taulukko 1. Ingolstädter Straße 139/141. Rakennuksen lämmönläpäisykertoimet ennen ja remontin jälkeen [2].

Rakenne	U-arvo ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	
	Ennen	Jälkeen
Ulkoseinä	0,42	0,15
Yläpohja	1,79	0,13
Alapohja	1,15	0,14
Ikkunat	2,8	0,85

Rakennukseen asennettiin koneellinen ilmanvaihto. Ilmanvaihtokone, jonka lämpötilaerotusuhde on 85 prosenttia, sijoitettiin ullakolle. Jokaiseen asuntoon johdettiin ullakolta sekä tulo- että poistoilmapiput ja tilaa asunnon sisäisille ilmastointipiipuille löytyi eteisen katosta, jota laskettiin. Lämpöenergian tarve laski huomattavasti alkuperäiseen verrattuna ja loppulämpö hankitaan kaukolämpönä sekä katolle asennetuilla aurinkokeräimillä.



Kuva 3. Ingolstädter Straße 139/141. Rakennuksen lämmöntarve [kWh/m<sup>2</sup>/vuosi] ennen remonttia ja remontin jälkeen [2].

Kuva 4:ssä on esitelty toinen hyvin dokumentoitu kohde, joka on toteutusvaiheessa nyt eli 2008/2009. Rotlintstraße 116-128 on 54 asunnon kerrostalo Frankfurt am Mainissa, rakennettu 1956. Korjauksen pääurakoitsijana toimii 'faktor10' [3] ja tieteellisestä puolesta vastaa IWU Darmstadt [4]. Tilaaja on ABG Frankfurt Holding GmbH [5].



Kuva 4. Rotlintstraße 116-128. a) Ennen saneerausta, rakennettu 1956. b) Malli kohteesta saneerattuna. [6]

Kyseessä on täydellinen saneeraus, jossa asuntoja yhdistellään isommiksi ja rakennuksiin lisätään yksi uusi asuinkerros. Asuntoja tulee olemaan 56 saneerauksen jälkeen ja huoneistoala kasvaa 3150 m<sup>2</sup>:stä 4028 neliöön. Tässä kohteessa tavoitteena oli luoda ”nolla-emissio-passiivitalo” – eli energiatehokas passiivitalo, jonka vähäinen energiantarve täytetään rypsiöljyllä toimivalla generaattorilla tuotetulla sähköllä sekä ostamalla vihreätä sähköä, jota kompensoidaan syöttötariffin kautta kohteen omalla tuotannolla. Kohteen laajaa energiansäästöstrategiaa on kuvattu Taulukossa 2:ssa. Laskettu lämmöntarve on 15 kWh/m<sup>2</sup>/vuosi. Enemmän tietoa kohteesta löytyy mm. lähteistä [6-7].

Taulukko 2. Rotlintstraße 116-128. Korjausrakan energiatehokkuuden kohdealueita.

Energiansäästökohte	Strategia
Lämmin käyttövesi	desinfiointijärjestelmä kuumennuksen sijaan bakteerien tappamiseksi aurinkokeräimet vettä säästävä saniteetti
Lämminvesiputket	250% enemmän eristettä kuin normien mukaan
Sähkönkulutus	tehokkaat pumput asuntokohtainen stand-by-kytkin pyykinkuivauskaappi
Ilmanvaihto	koneellinen ilmanvaihto joka asunnossa oma LTO
Lämmitys	tuloilman jälkilämmitys energialähteinä rypsiöljygeneraattori huipputehon tarpeeseen kaasupoltin
Ilmanpitävyys	tavoite $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$

## 2.2 Toimisto-, koulu- ja liikerakennuksia

Esimerkkejä korjausrakentamisesta passiivitalostandardiin voi löytää myös toimisto-, koulu- ja liikerakennusten puolella. Yksi tyylikkäämmistä esimerkeistä on itävaltalaisen ilmanvaihtokoneiden valmistajan Drexel & Weissin pääkonttori Wolfurtissa, Kuva 5. 30 vuotta vanha teollisuusrakennus, vanha sukkatehdas, täyskorjattiin 10 kuukaudessa passiivitalon kriteerit täyttäväksi toimisto- ja tuotantorakennukseksi vuonna 2005. Lämmitettyä tilaa on 2871 netto-m<sup>2</sup>. Korjausprojektin arkkitehtinä toimi Gerhard Zweier, joka on tunnettu useista tyylikkäästä korjauskohteista, joissa myös sisustus on omaa luokkaansa.

Saneerattu rakennus on betonirakenteinen mutta julkisivut ovat kevytrakenteiset. Koska lämmöntarve on hyvin pieni, maksaa koko rakennuksen lämmitys vain noin 1000 €/vuosi. Tämä kattaa lämpöpumpun, tuulettimien ja pumppujen sähkönkulutuksen. Kohteen täyssaneeraus maksoi 409 €/m<sup>2</sup> eli 1,35 M€. [14]

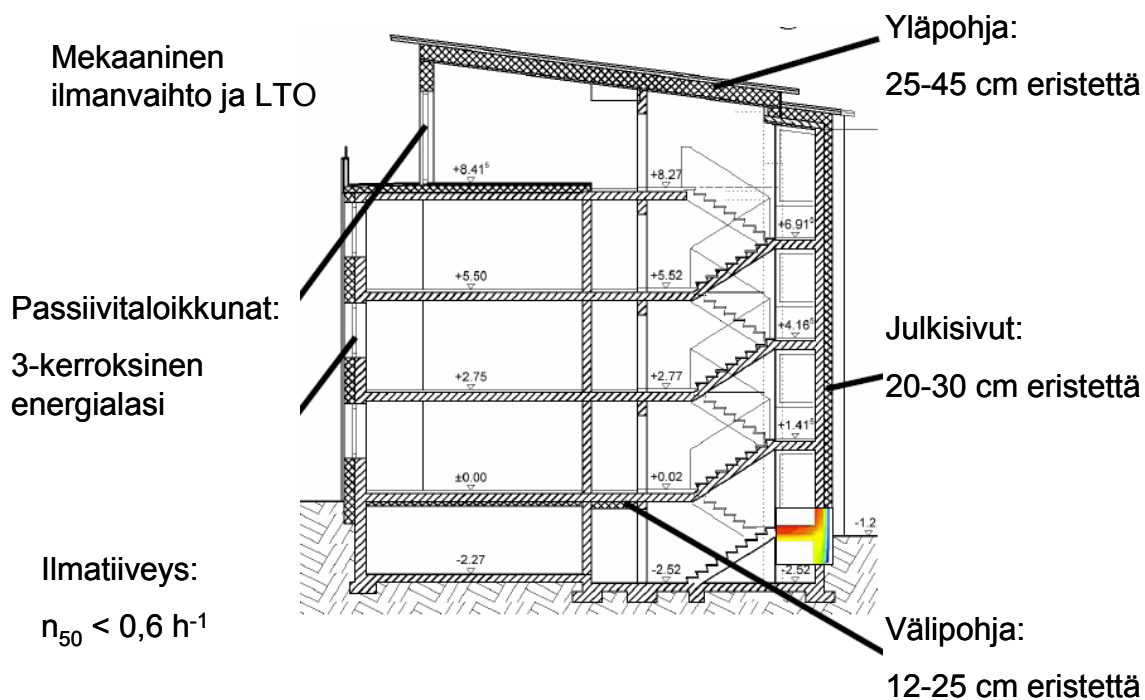


Kuva 5. Drexel & Weissin pääkonttori Wolfurtissa Itävallassa. Ennen ja jälkeen. [15]

### 2.3 Yleistä pitkälle viedyille energiasaneerauksille

Edellä on hyvin rajoitetusti ja esimerkinomaisesti esitelty konkreettisia keskieuropalaisia korjauskohteita. Kohteita, joissa energiategokkuus ja todella alhainen lämmöntarve ovat olleet tavoitteena, on kuitenkin jo paljon. Seuraavassa on tarkoitus antaa pieni yleiskuva niistä tavoitteista ja keinoista, jotka ovat tyypillisiä pitkälle viedyissä energiasaneerauksissa, etenkin asuinkerrostaloissa. Kuva 6 havainnollistaa tätä.

- Energiansäästöavoitteet ovat kunnianhimoiset!
  - tavoitteena yleensä säästää noin 90%
- Paljon eristettä ulkoseiniin!
  - esim. 200-300 mm neoporia tai vastaavaa
- Paljon eristettä yläpohjaan!
  - 250-450 mm
- Paljon eristettä alapohjaan!
  - kerrostalokohteissa tämä on yleensä kellarikerroksen yläpohja
  - 120-250 mm
- Huomattava ilmatiiveys!
  - saavutetaan huolellisella työllä ja hyvillä tuotteilla
  - tavoitteena  $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$
  - mitattu jopa  $n_{50} = 0,35 - 0,48 \text{ h}^{-1}$
- kaikkiin asuntoihin asennetaan koneellinen ilmanvaihto lämmöntalteenotolla!
- uudet huipputehokkaat ikkunat!
  - asennus oikeaoppisesti eristekerroksen jatkoksi
- tyhjiöeriste on ratkaisu kohteissa ja detaljeissa, joissa tilaa eristämiseen on rajoitetusti!
  - Samaan U-arvon päästää tyhjiöeristeen kanssa noin neljäsosan paksuudella esimerkiksi tavallisesta kivivillasta.



Kuva 6. Energiakorjauksen tyypillinen strategia. Inspiraationa [2]



Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä ja siis myös lämmöntalteenotto toteutetaan joko keskitettynä ratkaisuna, esimerkiksi per rappu, tai sitten hajautettuna. Keskitetyssä ratkaisussa pitää löytää tilaa putkistolle joko rappukäytävästä tai asunnoista. Hajautetussa systeemissä jokaiseen asuntoon asennetaan oma ilmanvaihtosysteeminsä. Hajautetun systeemin etuna ovat asennuksen helppous ja edullisuus, kun taas keskitetyn ratkaisun etuna ovat tehokkuus ja toimintavarmuus, koska huolto ei ole asukkaan vastuulla. Molempia ratkaisuja käytetään.

### **3. Energiakorjaushankkeen suunnittelu ja toteutus**

#### **3.1 Energia- ja rakennusfysikaaliset laskelmat suunnittelun apuna**

Korjauskohteiden – niin kuin uudisrakennustenkin – rakennusfysikaalisen suunnittelun apuna tulee luonnollisesti käyttää erilaisia soveltuvia laskentatyökaluja. Kun pyritään äärimmäisen energiatehokkaaseen lopputulokseen, on sekä jatkuvasti päivitetyillä energialaskelmilla että esimerkiksi 2-3D-mallintamisen avulla tapahtuvalla kylmäsiltojen vähentämisellä suuri rooli suunnittelun edetessä. Vanhoissa rakennuksissa usein massiiviset rakenteiden liitokset aiheuttavat huomattavan kylmäsilan, kun ympärillä olevia rakenteita eristetään. Kylmäsiltojen minimointi on kuitenkin oleellista, jos halutaan päästä passiivitalostandardiin tai edes lähelle. Siksi kylmäsiltojen laskennallinen mallintaminen kuuluu luonnollisena osana suunnitteluprosessiin.

Passiivitalostandardiin pyrittäessä on suotavaa käyttää energialaskennassa PHPP:tä (Passivhaus Projektierungs Paket), koska juuri tällä erittäin matalan lämmöntarpeen rakennuksiin suunnitellulla työkalulla todennetaan laskennallinen energiantarve passiivitalon kriteerien täyttämiseksi sertifiointijärjestelmän mukaan. [8-9].

Ulkopuolinen eristäminen on vanhojen rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta yleensä se ehdottomasti paras ratkaisu: Kun vanha rakenne eristetään ulkopuolelta, nousee rakenteen lämpötila. Jos samanaikaisesti huolehditaan sisäpinnan ilmanpitävyydestä, laskee vanhan rakenteen kosteuskuormitus useimmissa tapauksissa. Uudentyyppisten ratkaisujen ja rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta on kuitenkin varmistuttava kosteusteknisin analyysien, joihin dynaamiset simulointityökalut, kuten Wufi Pro [10], osavissa käsissä soveltuvat parhaiten. Dynaamisten laskentatulosten tulkintaan toimivuuden kannalta voidaan lisäksi soveltaa laskennallista homeindeksin määrittystä, josta paljon tarkemmin esimerkiksi toisaalla tässä seminaarissa [11].

Sisäilman viihtyvyyden todentaminen jo suunnittelun aikana vaatii myös laskentaa. Kohteesta ja sen vaatavuudesta riippuen otetaan käyttöön joko yksinkertaisemmat taulukkolaskentaan perustuvat työkalut (sisältyy esimerkiksi PHPP:hen) tai tartutaan järeämpiin työkaluihin eli dynaamisiin energiasimulointeihin, kuten IDA [12]. Tehokasta aurinkosuojausta ei tule unohtaa viihtyisän sisäilman takaamiseksi, kun rakennusten lämpöhäviöitä vähennetään ratkaisevasti. Aurinkosuojauksen laatu ja tehokkuus sekä vaikutus sisälämpötilaan kannattaa mitoittaa laskennallisilla työkaluilla, kuten esim PHPP:llä tai IDA:lla.

#### **3.2 Projektin toteutusvaihe**

Yksi hyvin suunnitellun korjaushankkeen suurimmista ongelmista ja haasteista on asukkaille koituva haitta toteutusvaiheen aikana. Tavoitteena on yleensä, että asukkaat voivat jäädä asumaan, koska näiden siirtäminen on sekä hankalaa että kallista. Kokemukset kattavista energiasaneerausprojekteista ovat osoittaneet tämän mahdolliseksi ja siksi myös ikkunoiden

vaihtaminen ja koneellisen ilmanvaihtosysteemin luominen asuttuihin huoneistoihin on mahdollista jopa muutamassa päivässä per huoneisto [2]. Tämä luo todellisia haasteita töiden suunnitteluun, mutta on kaikkien edun mukaista.

Ulkopuolisen lisäeristyksen rakennusfyysisen toimivuuden edut yhdessä asukkaille aiheutuvan pienemmän haitan kanssa puhuvat vahvasti tämän puolesta. Sisäpuolista eristystä tulee käyttää vain kohteissa, joissa ulkopuolinen eristäminen on mahdotonta esimerkiksi rakennuksen historiallisen arvon takia. Sisäpuolinen eristäminen asettaa hyvin tiukat vaatimukset niin suunnittelulle, materiaalien valinnalle kuin toteutuksellekin.

Toteutusvaiheen suurimpia haasteita logistiikan lisäksi on lisäeristetyn ulkovaipan saaminen ilmanpitäväksi. Tässä toteutuksella ja varsinkin sen valvonnalla on suuri rooli. Jos halutaan täyttää passiivitalostandardin vaatimukset, tulee korjatun rakennuksen ilmanpitävyys ja mahdolliset vuotokohdat testata painekokeen avulla ja pyrkiä samaan ilmanpitävyyteen kuin uudisrakennuksissa eli  $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ . Mittaukset eri energiasaneerauskohteista todistavat, että tämä on mahdollista [2].

### 3.3 Projektien kannattavuus

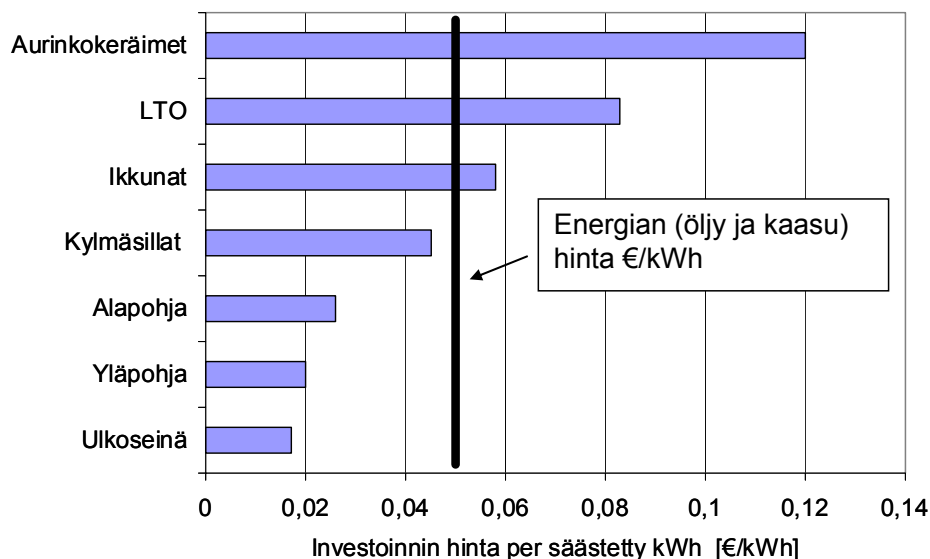
Hankkeiden kannattavuuden arvioiminen riippuu tietenkin monista reunaehdoista. Usein energiasaneerauskohteissa on edessä saneeraus joka tapauksessa, jotta voidaan täyttää nykyajan tarpeet asumisen tai käyttövaatimusten tasolle. Siten lisäkustannus energiatehokkuuden lisäämiseksi standardiratkaisusta esimerkiksi passiivitalostandardiin on vain pienempi osa kustannuksista.

Kustannuksia arvioitaessa tulee myös ottaa huomioon asumisen ja sisäympäristön parempi laatu ja viihtyvyys, kun tarvittava ilmanvaihto voidaan taata mekaanisen ilmastoinnin avulla ja entistä paremmat ikkunat antavat paremman termisen symmetrian ja toimivat myös ääneneristäjinä.

Monille korjausstrategioille ja erityisesti ulkoseinien ulkopuoliselle eristämislle on ominaista, että se eristys, joka nyt laitetaan, on ”esteenä” mahdolliselle tulevaisuudessa tulevalle lisäeristystarpeelle julkisivun kestoajan aikana. Siksi on parempi eristää kerralla kunnolla ja tulevaisuutta ajatellen jokaisen julkisivukorjauksen yhteydessä.

Kuva 7 havainnollistaa suuntaa-antavasti taloudellisesti kannattavimmat energiasaneerauksen kohteet viiden konkreettisen korjauskohteen perusteella. Näissä käytettiin passiivitalokomponentteja. Kannattavuus riippuu tietenkin sekä komponenttien että energian senhetkisestä hinnasta. Komponenttien tehokkuuden kasvu ilman huomattavaa hinnankorotusta ja energianhinnan samanaikainen nousu tekevät kalleimmistakin komponenteista entistä kannattavampia.

Jos tukiohjelmia on käytettävissä, kuten viime vuosina on tilanne esimerkiksi Saksassa ollut, tilanne on vielä parempi.



Kuva 7. Yksittäisten komponenttien hinta verrattuna niiden energiansäästöpotentiaaliin parin vuoden takaisen hintatason mukaan. Inspiraationa [2]. Huom! Käyttöikaoletuksina käytetty: 40v rakenteille, 30v ikkunoille, 25v ilmastoinnille ja 20v aurinkokeräimille. Saksalaiset hinnat.

#### 4. Yhteenveto

Tämän esityksen ensisijaisena tarkoituksena on rohkaista kaikissa tulevissa julkisivu-, putki- ja muissa suuremmissa korjausrakentamisen kohteissa pyrkimään samalla mahdollisimman pitkälle rakennuksen energiatehokkuudessa. Nyt tehtävät korjaukset kestävät vuosia ja vuosikymmeniä, ja siksi tulevaisuuden energiatehokkuuden vaatimukset tulisi ottaa mukaan nyt kerralla. Myöhemmin ne maksavat liikaa.

Kokemukset keskieuropalaisesta korjausrakentamisesta osoittavat, että on sekä teknisesti, logistisesti että taloudellisesti mahdollista saneerata vanhojakin rakennuksia niin pitkälle, että ne täyttävät passiivitalojen tiukat energiankäyttökriteerit. Avainstrategiana on huolellisen suunnittelun ja toteutuksen lisäksi: paljon lisäeristettä ulkovaipan ulkopuolelle, uudet energia-ikkunat eristekerroksen jatkeeksi, koko rakennuksen erittäin hyvän ilmanpitävyyden varmistaminen sekä koneellisen ilmanvaihdon ja lämmöntalteenoton asentaminen. Ja kaikki tämä toteutetaan ilman asukkaiden siirtämistä.

Lähtökohdaksi suomalaiselle korjausrakentamiselle meidän paljon kylmemmässä ilmastossamme tulisi olla vähintään Keski-Euroopassa käytetyt ratkaisut, esimerkiksi eristepaksuudet. Uusien ratkaisujen toimivuus tulee aina antaa asiantuntijoiden arvioitavaksi, mutta se ei saa toimia esteenä suomalaisen rakennuskannan energiatehokkuuden roimalle parantamiselle.

#### Lähdeluettelo

- [1] Pajakkala, P. Korjausrakentamisemme tila kansainvälisessä vertailussa. Esitys AsuntoForumissa 23.3.2009. [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi)
- [2] Arkkitehtitoimisto Schulze Darup & Partner GmbH [www.schulze-darup.de](http://www.schulze-darup.de)
- [3] Insinööritoimisto faktor10 GmbH [www.faktor10.com/](http://www.faktor10.com/)
- [4] Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. [www.iwu.de](http://www.iwu.de)
- [5] ABG Frankfurt Holding GmbH [www.abg-fh.de](http://www.abg-fh.de)

- [6] Rasch, F., Grenz, P. Der logische Weg – Vom Passivhaus über das „zero-emission-house“ zum Warmmietenmodell. 13. International Passivhaustagung. Frankfurt an Main. 2009. pp. 397-402
- [7] Großklos, M., Hörner, M., Diefenbach, N. Energieeffizient, klimaneutral oder nachhaltig? – Das Null-Emissions-Passivhaus am Beispiel der Rotlintstraße in Frankfurt. 13. International Passivhaustagung. Frankfurt an Main. 2009. pp. 167-172
- [8] Feist, W., Pfluger, R., Kaufmann, B., Schnieders, J., Kah, O. Passivhaus Projektierungs Paket 2007. Passivhaus Institut, Darmstadt
- [9] Pedersen, S. Kokemuksia pohjoismaisista passiivitaloista ja niiden sertifioinnista. Rakennusfysiikka 2007. pp. 247-252
- [10] WUFI (Wärme und Feuchte instationär - Transient Heat and Moisture) 4.1 Pro software, The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP.
- [11] Ojanen, T. et. al. Homeen kasvun mallintaminen vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Rakennusfysiikka 2009.
- [12] [www.equa.fi](http://www.equa.fi)
- [13] Passivhaus Institut. Darmstadt. [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [14] Arkkitehtitoimisto Gerhard Zweier, Wolfurt, Itävalta [www.zweier.at](http://www.zweier.at)
- [15] [www.drexel-weiss.at](http://www.drexel-weiss.at)

## Passiivitalosuunnittelijoiden koulutus ja sertifiointi

Ruut Peuhkuri<sup>1</sup>, Søren Pedersen<sup>1</sup>, Ingrid Weiss<sup>2</sup> ja Annette Bähr<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Passiivitalo.fi Oy / Passivhus.dk ApS

<sup>2</sup> WIP-Renewable Energies

<sup>3</sup> Passivhaus Dienstleistung GmbH

### Tiivistelmä

Äärimmäisen energiatehokkaiden rakennusten – ja erityisesti passiivitalojen – kysyntä on kasvanut räjähdysmäisesti Keski-Euroopassa mutta myös Pohjoismaissa. Matalaenergiaratkaisuihin erikoistuneiden ja osaavien arkkitehtien ja insinöörien vähyys aiheuttaa kuitenkin pullonkaulaa edistykselle sekä epävarmuutta energiatavoitteiden saavuttamisesta oikein valituilla oletuksilla ja laskentatavoilla. Viime syksynä alkaneen IEE-projektin ”Certified European Passive House Designer (CEPH)” tarkoituksena on kehittää suunnittelijoille kattava jatkokoulutus erityisesti passiivitalojen suunnitteluun. Kurssi auttaa hallitsemaan erittäin energiatehokkaan rakentamisen soveltamiseen liittyviä haasteita ja ratkaisuja. Kurssit ovat laajuudeltaan noin 2 ov ja intensiivisen opetuksen päätteeksi on koetilaisuus, jonka läpäisy oikeuttaa henkilösertifikaattiin ”Certified Passive House Designer”. Sertifikaatin myöntää saksalainen Passive House Institute, joka myös hallinnoi passiivirakennusten kansainvälistä sertifiointikäytäntöä.

### 1. Johdanto

Kiinnostus passiivitaloja kohtaan on jyrkässä nousussa ympäri Eurooppaa ja useimmat rakennusalan toimijat tuntevat käsitteen **passiivitalostandardi**. Passiivitalo-määritelmä on 1990-luvulta lähtien levinnyt Saksasta naapurimaihin standardina rakennuksille, joissa äärimmäinen energiansäästö on myös taloudellisesti kannattavaa [1]. Passiivitalojen kunnianhimoisia energiansäästöpäämääriä varmistamaan ja valvomaan, perustettiin 1997 passiivitalojen sertifiointikäytäntö [2].

Passiivitalo-sertifikaatti annetaan rakennuksille, jotka täyttävät alla olevat kolme passiivitalon kriteeriä [2]:

1. Lämmitysenergian tarve  $< 15 \text{ kWh/vuosi/netto-m}^2$
2. Ilmanpitävyys  $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$
3. Primäärienergiankulutus  $< 120 \text{ kWh/vuosi/netto-m}^2$

Kriteeri 3 sisältää lämmitysenergian ja lämpimän käyttöveden lisäksi myös muun kotitalouden käyttämän energian painotettuna primäärienergiafaktoreilla.

Nämä kriteerit ovat voimassa tietyin laskentaoletuksin. Kriteerit on alun perin suunniteltu Keski-Eurooppaa varten, mutta perusidea on voimassa kaikkialla: Talot on eristettävä niin hyvin, että taloteknisiä järjestelmiä pystytään vähentämään ja yksinkertaistamaan. Näin saadaan aikaan säästöjä rakentamisvaiheessa ja passiivitalojen rakentaminen tulee taloudellisesti houkuttelevammaksi kuin vain rakennusmääräykset juuri ja juuri täyttävä rakennus. Passiivitalostandardi on jo käytännössä rakennusmääräysten vähimmäisvaatimus monessa keskieurooppalaisessa kaupungissa ja hallintoalueella. Varsinkin julkisen rakentamisen

vaatimukset ovat jo laajalti passiivitalostandardin mukaisia. Pohjoismaistakin esimerkiksi Tanskassa on jo useita päiväkoteja rakenteilla passiivitalorakennuksina.

EU-parlamentin ehdotuksella komissiolle tammikuussa 2008 oli merkittävä passiivitalokehitystä edistävä signaaliarvo: Sen mukaan vuodesta 2011 lähtien kaikki uudet lämmittämistä tai jäähdyttämistä vaativat rakennukset tulisi vähintään rakentaa täyttämään passiivitalo- tai vastaavan standardin. Lisäksi jo nyt pitäisi priorisoida passiivisia lämmitys- ja jäähdytysstrategioita rakennusten energiankulutuksen vähentämiseksi. [3]

Passiivitalostandardi ei tietenkään ole ainut varteenotettava erittäin tehokkaan matalaenergiarakentamisen muoto. Muitakin määritelmiä ja käsitteitä on liikkeella, mm. sveitsiläinen Minergie-konsepti [4] ja Pohjoismaissakin on jo useita erilaisia ”kansallisia” konsepteja ja määritelmiä. Periaatteet ovat kuitenkin pitkälti samoja energia- ja ekotehokkaassa rakentamisessa: rakennuksen vaipan ja ilmanvaihdon lämpöhäviöiden minimointi ja ilmais- ja uusiutuvan energian hyväksikäyttö.

Toisaalta energiatehokkaista rakennuksista elää niin kuluttajien, rahoittajien kuin päättäjien ja suunnittelijoiden mielessä sitkeitä myyttejä ja väärinkäsityksiä, jotka voivat viime kädessä vaikuttaa negatiivisesti rakennusprojektin valintoihin.

Saksassa ja Itävallassa on nähtävissä tendenssi, jossa passiivitaloihin liittyvät negatiiviset myytit ja asenteet ovat vallalla rakentajapiireissä niin kauan kuin oikea tieto ja osaaminen on vähäistä. Tiedon ja osaamisen lisääntyessä vakuuttuvat useimmat asianomaiset passiivitalojen hyvistä puolista, joista yksi tärkeimmistä on myös pyrkimys kustannustehokkaisiin ratkaisuihin.

Asiallisen ja informoivan tiedon saannissa on siis parantamisen varaa. Asiantuntijapuolella on nähtävissä vastaavanlaatuinen mutta yksityiskohtaisemman tiedon tarve: Vaikka passiivitalon periaatteet ja kriteerit ovatkin harvinaisen selvät ja yksinkertaiset, vaatii niiden toteuttaminen ja varsinkin todentaminen tarkkaa tietoa sekä oikeita laskentaoletuksia. Kiinnostus passiivitaloja kohtaan on Suomessakin hyvällä mallilla, mutta erityisesti oikeiden laskentaoletusten ja yhdenmukaisen todentamisen puute tekee passiivitalomarkkinoista ns. villin lännen, jossa melkein kuka vain voi julistaa tekevänsä passiivitalon. Energiatehokkaan rakentamisen intoa ja iloa ei tietenkään tule tappaa, mutta asiantuntevasta suunnittelusta ja toteutuksesta on joka tapauksessa vielä huutava pula.

Siksi todellinen äärimmäisen energiatehokkaan rakentamisen läpimurto ja markkinoiden vastaava kehittyminen pääsevät kunnolla käyntiin vasta kun saatavilla on tarpeellinen määrä asiansa osaavia ammattilaisia: koulutettuja arkkitehtejä ja insinöörejä, joilla on passiivitalojen suunnitteluun ja soveltamiseen liittyvien haasteiden ja ratkaisujen erikoisosaaminen. Tällä hetkellä todellisten osaajien vähyys aiheuttaa pullonkaulaa edistykselle sekä epävarmuutta energiatavoitteiden saavuttamisesta oikein valituilla oletuksilla ja laskentatavoilla. Asiantuntijuuden leviäminen auttaisi myös objektiivisen ja toimivan tiedon saamista rakentamisen eri toimijoiden keskuudessa.

Viime syksynä (2008) alkaneen IEE-projektin ”Certified European Passive House Designer (CEPH)” tarkoituksena on vastata omalta osaltaan lievittämään tätä asiantuntijuuden puutteellisuutta. CEPH:n tavoitteena on lyhyesti kehittää ja antaa suunnittelijoille kattava passiivitalosuunnittelun jatkokoulutus. Kurssit, joita ensin tarjotaan sekä saksaksi että englanniksi ja projektin edetessä myös osallistuvien partnereiden kansallisilla kielillä, ovat laajuudeltaan noin 2 ov ja intensiivisen opetuksen päätteeksi on koetilaisuus, jonka läpäisy

oikeuttaa sertifiointiin ”Certified Passive House Designer”. Sertifiointia myöntää saksalainen Passive House Institute. Sertifiointia saaneet suunnittelijat rekisteröidään tietokantaan, mikä antaa potentiaalisille rahoittajille ja rakennuttajille varmuuden valitun suunnittelijan osaamisesta toivottujen energiavoitteiden saavuttamisesta.

Tässä esitelmässä käydään läpi passiivitalosuunnittelijakoulutuksen tilanne ja esitellään koulutuksen sisältöä. Tämä esitys täydentää vuonna Rakennusfysiikka 2007 – päivillä esitettyä passiivitalojen sertifiointikäytäntöä, jossa Passivhaus.dk on yksi valtuutetuista sertifiointijäsenistä [2]. Ruut Peuhkuri on mukana partnerina ja kouluttajana tässä passiivitalosuunnittelijoiden koulutusohjelman suunnitteluprojektissa (CEPH). Muut kirjoittajat ovat pitkän linjan pohjoismaisen passiivitalopioneeri Søren Pedersen, CEPH:n projektikoordinaattori Ingrid Weiss sekä yksi tärkeimmistä saksalaisista kouluttajista Annette Bähr.

## 2. Koulutuksen rakenne ja sisältö

Edellä esitettyihin haasteisiin suunnittelijoiden – arkkitehtien ja insinöörien – keskuudessa on nyt herätty vastaamaan. Erityisesti kyse on ollut konkreettisen ja systemaattisen tiedon ja osaamisen puutteesta. Vuonna 2007 eza! ja Passivhaus Dienstleistung aloittivat yhdessä Passive House Institutin kanssa ensimmäisten kurssien kehittämisen ja pitämisen. Kurssien tavoitteena oli luoda ”sertifioituja passiivitalosuunnittelijoita”. Korkealuokkaisen koulutusmateriaalin kokoaminen ja kehittäminen on haastavaa ja siihen ovat osallistuneet useat passiivitalorakentamisen kokeneimmat asiantuntijat.

Kursseja alettiin tarjota myös muualla Saksassa sekä Itävallassa. Kysyntä jo saksan kielialueella on ollut valtavaa ja siksi kurssien sisällön yhdenmukaistamisen ja parantamisen lisäksi tarve nähtiin kurssien tarjoamisessa useammalla kielellä. Jo kurssien tarjoaminen englanniksi mahdollistaisi tiedon kansainvälisen levinneisyyden, mutta koska IEE-ohjelma päätti rahoittaa CEPH-projektia, toteutetaan kurseja useammalla eurooppalaisella kansallisella kielellä. Opetuksen ja materiaalin saaminen omalla kielellä on joka tapauksessa tehokkainta asioiden omaksuminen kannalta.

### 2.1 Projektikonsortio ja tehtävänjako

Kansainvälinen projektikonsortio koostuu 12 partnerista yhteensä yhdeksästä eri EU-maasta. Suurella osalla partnereita on jo paljon kokemusta passiivitalosuunnittelun alalta, myös jatkokoulutuksen suhteen. Lisäksi monet partnerit ovat tai ovat olleet mukana lukuisissa muissa passiivitaloja käsittelevissä EU-projekteissa, mikä antaa tälle projektille hyvän synergian.

Partnereiden ensisijaiset vastualueet on jaettu seuraaviin päätehtäviin:

Kurssisisällön ja -materiaalin sekä opetusmetodin (jatko)kehitys, pilottikurssien vetäminen ja arviointi, opettajakoulutuksen kehittäminen ja vetäminen sekä todistusten valmistelu, jne.:

- eza! energie- und umweltzentrum allgäu, Kempten, Saksa
- Passivhaus Dienstleistung GmbH, Darmstadt, Saksa
- Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn, Itävalta

Sertifiointikokeiden järjestäminen, sertifioitujen suunnittelijoiden tietopankin ylläpito, englanninkielisen käännöksen tarkastus, laadunvarmistus, jne.:

- Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist, Darmstadt, Saksa

Kurssimateriaalin kääntäminen kansallisille kielille, suunnittelijakoulutuksen järjestäminen omassa maassa pätevöityjen opettajien antamana, jne.:

- La Maison Passive, Ranska
- TBZ GmbH, Etelä-Tiroli, Italia
- ECN – Energieonderzoek Centrum Nederland, Alankomaat
- Passivhus.dk ApS, Tanska
- Aarhus School of Architecture, Tanska
- Centrum pasivniho domu, Tsekin tasavalta
- IEPD – Institut pre energeticky pasivne domy, Slovakia
- University of Strathclyde, UK

Projektikoordinaattori:

- WIP – Renewable Energies, Saksa

## 2.2 Tärkeä osa ammattilaisten jatkokoulutusta

Vaikka kurseille ei olekaan pääsykokeita, on kurssien kohderyhmänä jo kokeneet ammattilaiset, jotka haluavat syventyä energiatehokkaan rakentamisen suunnitteluun. Kurssit on siis suunniteltu jatkokoulutukseksi ja siksi oletetaan että osallistujilla on sekä rakentamisen että rakennusfysiikan tuntemusta. Tällä hetkellä kurseja tarjotaan sekä yksittäisinä 2-3 päivän moduuleina että kahden viikon kokonaisuuksina. Yhteensä opetustunteja koko kurssin aikana on noin 70.

Yhtenä CEPH-projektin tavoitteena on tukea erityisesti passiivitalosuunnittelijoiden koulutusta maissa, joissa passiivirakentamisen markkinat ovat vasta kehittymässä ja siten edesauttaa tiedon ja osaamisen maantieteellistä leviämistä. Jo nyt kiinnostusta on projektikonsortion ulkopuolisista maista, joten myöhemmin kurseja tullaan todennäköisesti tarjoamaan kiinnostuksen mukaan muillakin kansallisilla kielillä.

## 2.3 Kurssien sisältö on tekninen ja käytännönläheinen

CEPH-projekti ja siten kurssien ja opetusmateriaalin kehittäminen on vielä kesken, joten kurssien lopullista yksityiskohtaista sisältöä ei ole lyöty lukkoon. Kirjallista materiaalia tulee olemaan noin 700 sivua, joista merkittävä osuus on esimerkkejä käytännössä toteutetuista ratkaisuksista tai kuinka ei saisi missään tapauksessa tehdä! Konkreettisin esimerkein havainnollistetaan siis ne periaatteet ja fyysiset lainalaisuudet, joilla rakennus saavuttaa mahdollisimman pienen rakenteiden ja ilmanvaihdon lämpöhäviön sekä parhaimmalla tavalla hyödyntää lämpökuormat. Passiivitalojen suunnitteluun kuuluu olennaisena osana myös rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen minimointi, mikä sisältää niin kodinkoneiden kuin talotekniikankin energiaoptimoinnin jakeluverkon häviöineenkin. Tämä passiivitalon ”oikean” suunnittelun kattavuus tulee monelle asiaan vihkiytymättömälle yllätyksenä ja on siis haaste sinänsä. Kurssin käyneille viimeistään paljastuu, että passiivitaloja ei voi alkuunkaan suunnitella yksinomaan tiettyihin ohje-U-arvoihin tai ilmanvuotolukuihin pohjautuen.

Kurssien sisältö on suunniteltu täyttämään Passive House Institutin asettamat oppimistavoitteet ”sertifioituille passiivitalosuunnittelijoille”. Oppimistavoitteet löytyvät saksalaisilta



passiivitalosuunnittelijakoulutuksen sivuilta [5]. Ne sisältävät sängen yksityiskohtaisesti sen, mitä jokaisen suunnittelijan tulee tietää passiivitalojen suunnittelusta: passiivitalon määritelmästä ja kriteereistä rakenteiden ja talotekniikan tarkkaan laskennalliseen suunnitteluun ja sisäilman viihtyvyyden varmistamiseen.

Passiivitalosuunnittelun kurssin sisältö on jaettu moduuleihin aihepiireittäin.

*Taulukko 1:*ssä on lyhyesti kuvattu kurssin sisältöä Passivhaus Diensleistungin kurssirakenteen perusteella. Kaikissa moduuleissa teoriaa, laskentaa ja valintojen vaikutusta havainnollistetaan lukuisin esimerkein jo toteutetuista passiivitaloista.

*Taulukko 1. CEPH-kurssien sisältö moduuleittain.*

<b>Moduuli</b>	<b>Keskeinen sisältö</b>
Passiivitalostandardi	Perehtyminen energiatehokkaan rakentamisen teoreettisiin perusteisiin.
Passiivitalon suunnittelutyökalu – PHPP työpaja	Perusteellinen valmennus PHPP-laskentatyökalun käyttöön. PHPP on ehdoton apuväline passiivitaloja suunniteltaessa.
Passiivitalon ulkovaippa	Vaipparakenteiden ja ikkunoiden U-arvojen ja kylmäsiltojen määrittäminen sekä ilmanpitävyyden ja laadunvarmistamisen periaatteet
Passiivitalon lämmitys	Pienen lämmöntarpeen erikoishaasteet talotekniikalle, myös lämmin käyttövesi, sen jakelu ja lämmönlähteet.
Passiivitalon ilmanvaihto - työpaja	Energiatehokkaan ja toimintavarman ilmastointisysteemin suunnitteluun paneudutaan konkreettisesti eikä vain teoriassa.
Passiivitalon taloudellinen kannattavuus	Perehtyminen mm. ratkaisujen elinkaarilaskelmiin.
Passiivirakentaminen saneerauskohteissa	Perehtyminen tyypillisiin haasteisiin, joihin remonttikohteissa törmätään, erityisesti kun tavoitteena on energiatehokkuus. Passiivitalokomponenttien mahdollisuudet.
Passiivitalon suunnittelu käytännössä	Koko suunnittelu- ja rakennusprosessi passiivitalotavoitteen valossa.
Kertaus - työpaja	Koko kurssin sisällön läpikäynti. Valmentaa kokeeseen.

Koska kurssi on jo tässäkin kokoonpanossa suhteellisen laaja, on siitä rajattu muutamia elementtejä pois: Kurssi käsittelee periaatteessa vain asuinrakennuksia, joten toimisto- ja liikerakennusten asettamat erikoishaasteet on jätetty pois. Toki keskeisiä passiivitalon suunnitteluperiaatteita voidaan hyödyntää näissäkin. Sama koskee myös laskentatyökalun (PassivHausProjektierungsPaket - PHPP) mahdollisuuksia, joista vain lämmöntarvevaatimusten kannalta tärkeimmät moduulit käydään läpi [6].

Yksi keskeinen osa passiivitalon suunnittelua eli kylmäsiltojen rakenteiden suunnittelu ja valinta jää myös osittain kurssin ulkopuolelle. Kurssilla selvitetään kyllä lineaariset ja pistemäiset kylmäsiltojen ja kuinka psi-arvot otetaan mukaan laskentaan. Mutta kylmäsiltojen laskennallinen määrittäminen 2D ja 3D –laskennan avulla on osallistujien joko hallittava etukäteen, opittava erikseen tai sitten suunnittelussa on turvaututtava kollegaansa, joka taitaa mallinnuksen.

## 2.4 Projektin ajankohtainen tilanne

Karkeasti ottaen CEPH-projektin työpanos keskittyy erityisesti kurssi- ja opetusmateriaalin kehittämiseen ja sen kääntämiseen saksasta seitsemälle muulle kielelle. Tällä hetkellä (alkusyksy 2009) materiaali alkaa olla valmis saksaksi ja siten käännöstyö on alkamassa.

Pilottikursseja pidettiin kesän alussa saksaksi Saksassa ja Itävallassa. Englanninkielisen materiaalin valmistuessa loppuvuodesta pidetään pilottikursseja englanniksi Itävallassa, Skotlannissa ja Tanskassa. Keväällä 2010 pidetään ensimmäiset pilottikurssit kansallisilla kielillä, mm Tanskassa. Projekti päättyy helmikuussa 2011 ja siihen mennessä noin 400 eurooppalaista insinööriä ja arkkitehtiä on saanut valmiudet passiivitalojen suunnitteluun.

Ensimmäisillä pilottikursseilla toimivat kouluttajina etupäässä saksalaiset ja itävaltalaiset kokeneet passiivirakentamisen kouluttajat. Tärkeä osa CEPH-projektia on kurssitarjonnan lisäksi laajentaa kouluttajakaarta. Kouluttajiksi valmennetaan siksi jo passiivitalojen suunnitteluun perusteellisesti perehtyneitä osajia eri maista. Uusille kouluttajille tarjotaan CEPH-projektin puitteissa myös pedagoginen koulutus.

## 2.5 Passiivitalosuunnittelijoiden henkilösertifiointi

Osana koko passiivitalorakentamisen pitkälle organisoitua laadunvarmistusta on myös koulutettujen suunnittelijoiden henkilösertifiointikäytäntö. Henkilösertifiointin tarkoituksena on antaa mm. rakennuttajalle varmuus suunnittelijan asiantuntevuudesta, kun liikutaan osaamisen erikoisalalla. Sertifikaatin saa läpäisemällä Passive House Institutin suunnitteleman ja järjestämän kirjallisen kokeen. Edellä kuvattu passiivitalosuunnittelijan kurssi on tarkoitettu myös valmistamaan tähän kokeeseen, joka yleensä pidetään kurssin jatkeena.

Alalla jo pitkään toimineet suunnittelijat, joilla on vankka passiivitalojen suunnittelukokemus, voivat saada sertifikaatin yksittäisen **sertifioidun** passiivitaloprojektin perusteellakin. Rakennuksen sertifikaatti ja projektimateriaali lähetetään Passive House Instituuttiin arvioitavaksi. Passiivitaloprojektien sertifiointia tarjoaa tällä hetkellä 17 eri instituutiota, jotka ovat Passive House Institutin valtuuttamia. Lista näistä löytyy Passive House Institutin sivuilta [7].

Sertifioidut passiivitalosuunnittelijat ovat oikeutettuja käyttämään Kuva 1:n esittämää logoa.



Kuva 1. Logo, josta tunnistaa ”Sertifioidun passiivitalosuunnittelijan”.

### 3. Yhteenveto

Passiivitalojen suunnitteluun erikoistuneita insinöörejä ja arkkitehtejä on vielä kysyntään nähden hyvin vähän. Saksassa ja Itävällassa on parin viime vuoden ajan alettu tarjota jatkokoulutusta, jossa syvennyttään näiden hyvin energiatehokkaiden rakennusten suunnittelun saloihin. Mutta koska saksaksi annettava koulutus selvästi rajoittaa osaamisen maantieteellistä leviämistä, on viime syksynä alkaneen IEE-projektin ”Certified European Passive House Designer (CEPH)” yhtenä tärkeimpänä tarkoituksena kurssien edelleen kehittämisen lisäksi tarjota kurseja laajemmalla kielialueella. Kurssien, jotka ovat laajuudeltaan noin 2 ov, päätteeksi on koetilaisuus, jonka läpäisy oikeuttaa sertifikaattiin ”Certified Passive House Designer”.

Tämän CEPH-projektin tavoitteisiin kuuluu lisäksi olla luomassa läpinäkyvyyttä sertifiointikäytäntöön sekä varmistaa konseptin tulevaisuus ja käyttökelpoisuus muuttuvissa olosuhteissa. Laaja tiedottaminen konseptista ja koulutuksen mahdollisuuksista on yksi näistä strategioista.

Tämä suunnittelijoille tarjottava sängen teknispainoiteinen lisäkoulutus on yhdessä muun passiivitalokehityksen rinnalla mukana auttamassa eurooppalaisen rakennuskannan energiankulutuksen dramaattista vähentämistä. Sertifioidut passiivitalosuunnittelijat yhdessä jo pitkään toiminnassa olleen passiivirakennusten sertifiointin kanssa takaavat erittäin energiatehokkaan rakentamisen laadun ja – mikä tärkeintä – energiatavoitteiden saavuttamisen suunnittelussa ja mahdollistavat kohteiden yhdenmukaisen vertailun.

### 4. Kiitokset

Tämä esitys on osa tiedonsiirtoa eurooppalaisen ”Certified European Passive House Designer (CEPH)” -projektin (IEE/07/712/SI2.500398) osalta. Projektin toteutuksen on mahdollistanut eurooppalainen tukiohjelma IEE (Intelligent Energy Europe). CEPH:n tarkoituksena on kehittää ja antaa eurooppalaisille rakennusalan suunnittelijoille kattava passiivitalosuunnittelun jatkokoulutus. Projektin kotisivu: <http://www.passivehousedesigner.eu/>

### Lähdeluettelo

- [1] Feist, W. Protokollband Nr. 11: Kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt
- [2] Pedersen, S. Kokemuksia pohjoismaisista passiivitaloista ja niiden sertifiointista. Rakennusfysiikka 2007. pp. 247-252
- [3] European Parliament resolution of 31 January 2008 on an Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential (2007/2106(INI))
- [4] [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch)
- [5] [www.passivhausplaner.eu](http://www.passivhausplaner.eu)
- [6] Feist, W., Pfluger, R., Kaufmann, B., Schnieders, J., Kah, O. Passivhaus Projektierungs Paket 2007. Passivhaus Institut, Darmstadt
- [7] [www.passiv.de](http://www.passiv.de)



## Case Luukku House: Tavoitteena plusenergiatalo Madridissa ja nollaenergiatalo Helsingissä

Petri Pylsy<sup>1</sup>, Kimmo Lylykangas<sup>2</sup> ja Matias Keto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos / LVI-tekniikka

<sup>2</sup> Teknillinen korkeakoulu, Arkkitehtuurin laitos

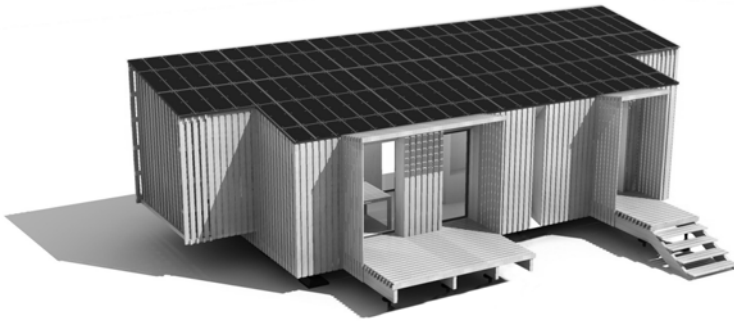
### Tiivistelmä

Solar Decathlon Europe 2010 on kansainvälinen opiskelijakilpailu, jossa suunnitellaan ja rakennetaan aurinkoenergiaa käyttävä plusenergiatalo Madridiin. Suomea edustava joukkue on suunnitellut kilpailua varten Luukku House- talon, jonka tavoitteena on olla vuositasolla plusenergiatalo Madridissa ja nollaenergiatalo Helsingissä. Tässä työssä on tutkittu U-arvojen, auringonsuojauksen, ilmanvaihdon LTO:n ja ohjauksen sekä tiiviiden vaikutusta tavoitteiden saavuttamisessa. Tulokset osoittavat, että Madridissa plusenergiatalotavoitteen saavuttaminen onnistuu reilusti kaikilla tarkastelluilla vaihtoehdoilla, mutta mitoittavana ilmasto toimii Helsinki. Helsingissä umpirakenteiden U-arvojen tulee olla välillä 0,10...0,14 W/m<sup>2</sup>K, ilmanvaihdon LTO:n lämpötilasuhteen 80 %, ikkunoiden U-arvon 0,3...0,7 W/m<sup>2</sup>K, auringonsuojauksen ja rakennuksen tiiviiden hyvät, jotta nollaenergiatalotasoa saavutettaisiin ja aurinkopaneelien tuoton vaihtelusta aiheutuvaa riskiä tavoitteen saavuttamisessa saataisiin pienennettyä. Tulee myös huomata, että niin Helsingissä kuin Madridissakin ikkunoiden ja auringonsuojauksen merkitys korostuu, koska Luukku Housen ikkunapinta-ala on suuri – 46 % huoneistoalasta.

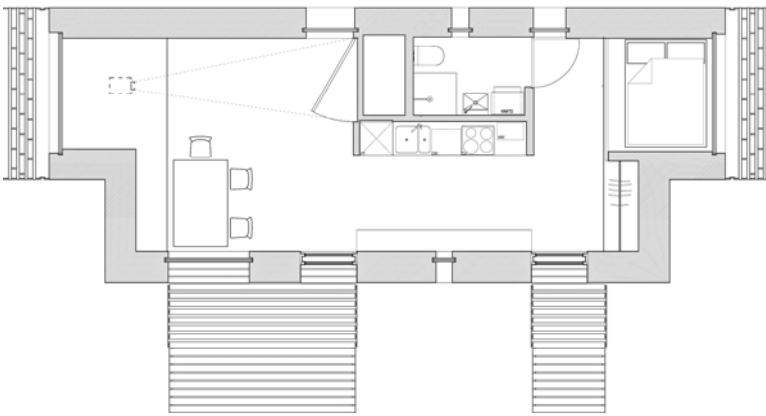
### 1. Johdanto

Solar Decathlon Europe 2010 on kansainvälinen opiskelijakilpailu yliopistoille. Kilpailutehtävänä on suunnitella ja rakentaa plusenergiatalo, joka käyttää vain aurinkoenergiaa, kahdelle henkilölle Madridiin. Kilpailu on ensimmäinen laatuaan Euroopassa. Suomea edustavan joukkueen tavoitteena on löytää ratkaisu, joka täyttää samaan aikaan plusenergiatalon vaatimukset Madridissa sekä nollaenergiatalon määritelmän Helsingissä vuositasolla. Tavoitteen saavuttamisen edellytyksenä on minimoida energian tarve ja maksimoida energian tuotanto pelkillä aurinkojärjestelmillä. Kilpailussa rakennukset on kytketty sähköverkkoon.

Suomen kilpailujoukkue koostuu Teknillisen korkeakoulun, Helsingin kauppakorkeakoulun ja Taideteollisen korkeakoulun opiskelijoista. He ovat suunnitelleet kilpailua varten Luukku House-talon (kuvat 1 ja 2). Kilpailussa on kymmenen eri arvostelukriteeriä esimerkiksi arkkitehtuuri, tekninen toteutus, aurinkojärjestelmät, energiatase, sisäilmasto, markkinalähtöisyys sekä innovatiivisuus. Vuotuisen energiatasotavoitteen lisäksi kilpailusäännöissä on annettu reunaehdot muun muassa sisälämpötilalle, jonka tulee olla Madridissa välillä 22...25 °C, talon varustukselle sekä rakennuksen koolle. Kilpailu ei ole myöskään pelkkä suunnittelutehtävä, vaan suunniteltu talo rakennetaan oikeasti Madridiin ja sen toimivuus testataan kilpailujakson aikana, jolloin talossa asuu osa kilpailujoukkueesta. Ennen Madridin kilpailujaksoa Luukku House tullaan rakentamaan Teknillisen korkeakoulun alueelle Espooseen. [1; 2]



Kuva 1. Luukku House- talo eteläsuunnasta. Arkkitehtisuunnittelu TKK Woodprogram 2008-09.



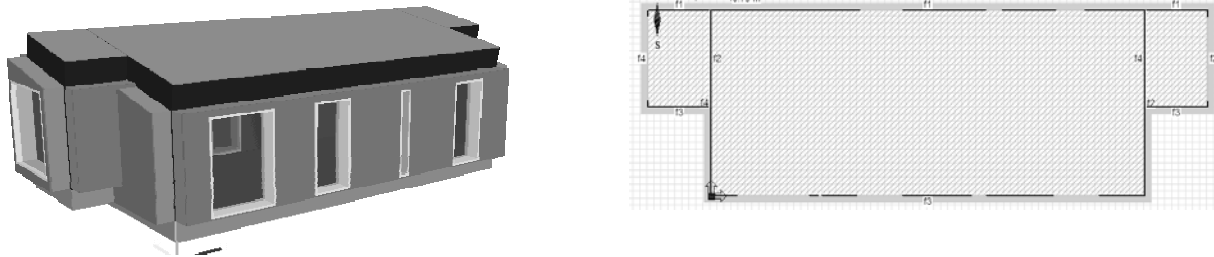
Kuva 2. Luukku House- talon pohjapiirros. Arkkitehtisuunnittelu TKK Woodprogram 2008-09.

Tässä työssä on tarkasteltu simuloimalla erilaisten parametrien vaikutusta plus- ja nollaenergiatalotavoitteiden saavuttamiseen Madridissa sekä Helsingissä Luukku House-talossa. Tutkittuina parametreina ovat olleet rakenteiden U-arvot, ikkunoiden auringonsuojaus, ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde, ilmanvaihdon ohjaus sekä rakennuksen tiiviys. Dynaamisena simulointityökaluna on käytetty IDA Indoor Climate and Energy- ohjelmaa [3].

## 2. Simulointien lähtötiedot ja simulointitapaukset

Rakennuksesta on muodostettu kolmiulotteinen laskentamalli, jossa on kolme laskentavyöhykettä (kuva 3). Laskennan säätietoina on käytetty Ilmatieteen laitoksen mittaamaa Helsingin säädataa vuodelta 2001. Madridin säätiedot ovat peräisin ASHRAE:lta.

Rakennuksen huoneistoala on  $42,5 \text{ htm}^2$  ja sisätilavuus  $107,7 \text{ m}^3$ . Ikkunoiden osuus huoneistoalasta on 46 %. Simuloinneissa käytetyt rakenteiden ja ikkunoiden lämmönläpäisykertoimet on esitetty taulukossa 1. Ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisykertoimet, tiiviyyttä kuvaavat  $n_{50}$ -luvut sekä ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteen (LTO) lämpötilasuhteet löytyvät taulukosta 2.



Kuva 3. 3-ulotteinen simulointimalli sekä laskentavyöhykejako.

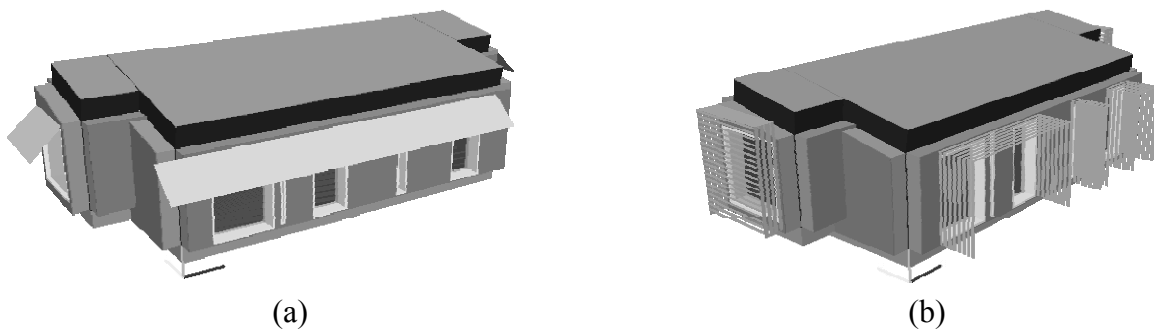
Taulukko 1. Simuloinneissa käytetyt eri rakenteiden  $U$ -arvovaihtoehdot.

Ulkoseinä (US)	Alapohja (AP)	Yläpohja (YP)	Ikkuna (IK)
$W/m^2K$	$W/m^2K$	$W/m^2K$	$W/m^2K$
0.08	0.08	0.06	0.3
0.10	0.10	0.08	0.7
0.14	0.14	0.10	1,1
0.17	0.17	0.14	1,4

Taulukko 2. Simuloinneissa käytetyt ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisykertoimet  $g_{tot}/g_{direct}$  (kokonais/suora),  $n_{50}$ -luvut ja LTO:n lämpötilasuhteet.

$g_{tot} / g_{direct}$	$n_{50}$	LTO
- / -	$1/h$	%
0,52 / 0,42	2,0	60
0,35 / 0,31	1,0	80
0,28 / 0,24	0,6	
	0,3	

Kuvassa 4 on esitetty simuloidut ulkoiset auringonsuojavaihtoehdot, jotka on etelä-, länsi- ja itäsuunnan ikkunoissa. Näiden lisäksi on tutkittu sekä lasivälissä että ikkunoiden ulkopuolella olevien sälekaihtimien potentiaalia.



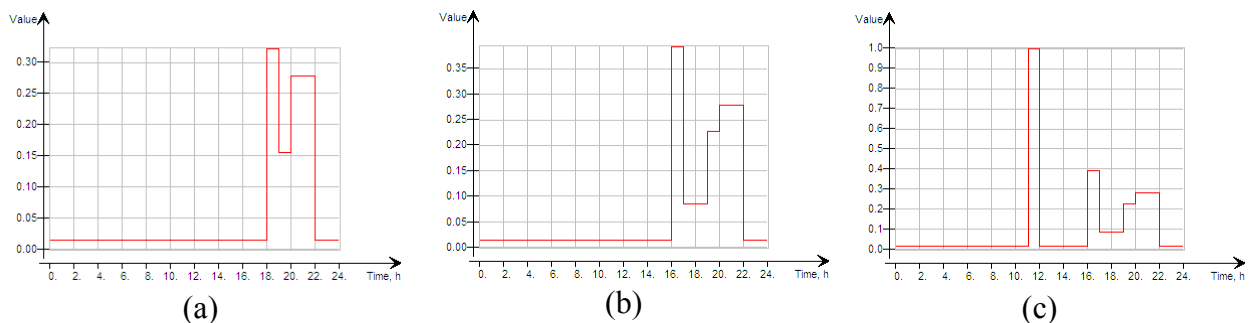
Kuva 4. Ulkopuoliset auringonsuojat: lipat (a) sekä kotelot (b).

Rakennuksen ilmanvaihtuvuutena on käytetty 0,5  $1/h$  tulo- ja poistoilmavirtojen ollessa yhtä suuret. Tuloilman sisänpuhalluslämpötila on vakio  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lisäksi on mallinnettu tarpeenmukaista ilmanvaihtoa poissaolokytkimellä. Poissaolokytkin- vaihtoehdossa ilmanvaihtoa ohjataan läsnäolo profiilin mukaan, jolloin rakennuksen ollessa tyhjiään ilmanvaihtoa pienennetään 40 prosenttiin alkuperäisestä. Ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho on  $2,0\text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ . Pumppujen sähkönkulutus  $430\text{ kWh/a}$ .

Simulointitapausten määrän rajaamiseksi on muodostettu referenssitapaus. Referenssitapauksen arvot on merkitty taulukoihin 1 ja 2 tummennettuina solujen värinä. Referenssitapauksessa ei ole käytetty ulkoisia auringonsuojauksia eikä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Eri parametrien

vaikutusta on tutkittu muuttamalla vain yhtä arvoa kerrallaan eli esimerkiksi ulkoseinän tapauksessa on muutettu vain ulkoseinän U-arvoa ja pidetty muut parametrit referenssitapausta vastaavana.

Rakennuksessa on oletettu asuvan kaksi henkilöä, jotka ovat poissa maanantaista perjantaihin klo 8-17 ja lauantaisin klo 11-16. Muulloin asukkaat ovat paikalla. Laitteiden aiheuttama tuntitason maksimilämpökuorma on 1622 W. Laitteiden käyttöprofiilit ovat kuvan 5 mukaiset, joka tarkoittaa vuotuisena keskitehona 2,4 W/htm<sup>2</sup>. Valaistuksen aiheuttama lämpökuorma on 3 W/htm<sup>2</sup>, joka vastaa led-valaistusta. Valaistus on käytössä klo 7-8 ja 17-18 maanantaista perjantaihin. Viikonloppuisin valaistus on päällä klo 9-11 ja 16-22. Kilpailusäännöistä poiketen lämmityksen asetusarvona on käytetty 20 °C ja jäähdytyksen 26 °C sekä Helsingissä että Madridissa, jotta tapaukset olisivat vertailukelpoisia.



Kuva 5. Laitteiden käyttöprofiilit maanantaista perjantaihin (a), lauantaisin (b) ja sunnuntaisin (c).

Rakennuksen lämmityksen hyötysuhteen arvoksi on oletettu 1,0 ja jäähdytyksen kylmäkertoimeksi 2,0. Aurinkopaneelien pinta-ala on 62 m<sup>2</sup> ja sähköenergiantuotto 119 kWh/a/paneeli-m<sup>2</sup> Helsingissä ja Madridissa 188 kWh/a/paneeli-m<sup>2</sup> [4]. Nämä arvot vastaavat noin 12 % PV-paneelien hyötysuhdetta. Lisäksi katolla on aurinkokeräimet käyttöveden lämmittämistä varten, joiden pinta-ala on 5 m<sup>2</sup>. Madridissa aurinkokeräimillä pystytään tuottamaan 80 % lämpimän käyttöveden energiatarpeesta ja Helsingissä 20 %. Aurinkopaneelien ja -keräimien asennuskulma vastaa katon kaltevuutta ja on 10°. Tämä kaltevuus on lähempänä Madridin olosuhteiden optimia, mutta kaltevuuden valintaan vaikuttivat myös arkkitehtoniset syyt sekä talon tilavuuden ja kuljetettavien osien korkeuden minimointi. Aurinkoenergian tuotannon kannalta kattokulma ei ole optimaalinen Helsingin sääoloihin.

### 3. Laskentatulokset

Laitteiden, puhaltimien, pumppujen sekä valaistuksen sähköenergian kulutus on 54 kWh/a/htm<sup>2</sup> käytettäessä perusilmanvaihtoratkaisua. Jos käytetään IV:n poissaolokytkintä, niin sähköenergian kulutus on 52 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Käyttöveden lämmittämiseen tarvittava lisäsähköenergia on Helsingissä 53 kWh/a/htm<sup>2</sup> ja Madridissa 12 kWh/a/htm<sup>2</sup>. PV-paneelien tuotto huoneistoalaa kohden on Helsingissä 174 kWh/a/htm<sup>2</sup> ja Madridissa 274 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Tällöin yhteenlaskettu tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus, joka ottaa huomioon lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän hyötysuhteen, voi olla Helsingissä enintään 68 kWh/a/htm<sup>2</sup>, jotta saavutetaan nollaenergiatalotavoite. Madridissa plusenergiatalon saavuttaminen vaatii, että lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus tulee olla pienempi kuin 209 kWh/a/htm<sup>2</sup>.

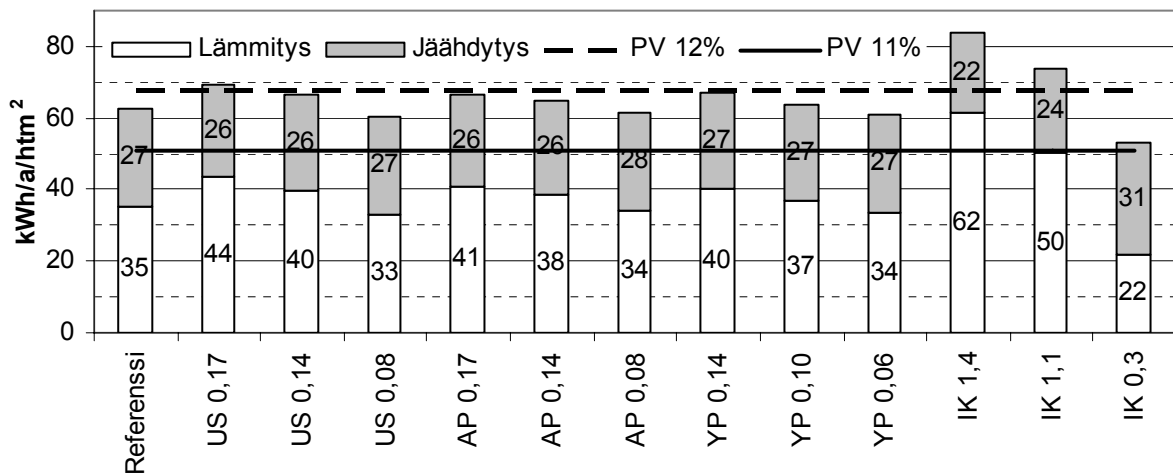


Kuvissa 6 ja 7 on esitetty tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukset, joissa on huomioitu lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien hyötysuhteet, eri laskentatapauksille Helsingissä. Kuviin on lisäksi piirretty viivat PV 12 % ja PV 11 %, joiden alapuolella rakennus kuluttaa vuositasolla vähemmän energiaa kuin tuottaa. PV 12 % kuvaa tilannetta, jossa PV-paneelien tuotto vastaa luvussa kaksi mainittua 12 % hyötysuhdetta ja PV 11 % tilannetta, jossa hyötysuhde olisikin yhden prosenttiyksikön tai PV-paneelien pinta-ala  $6 \text{ m}^2$  pienempi.

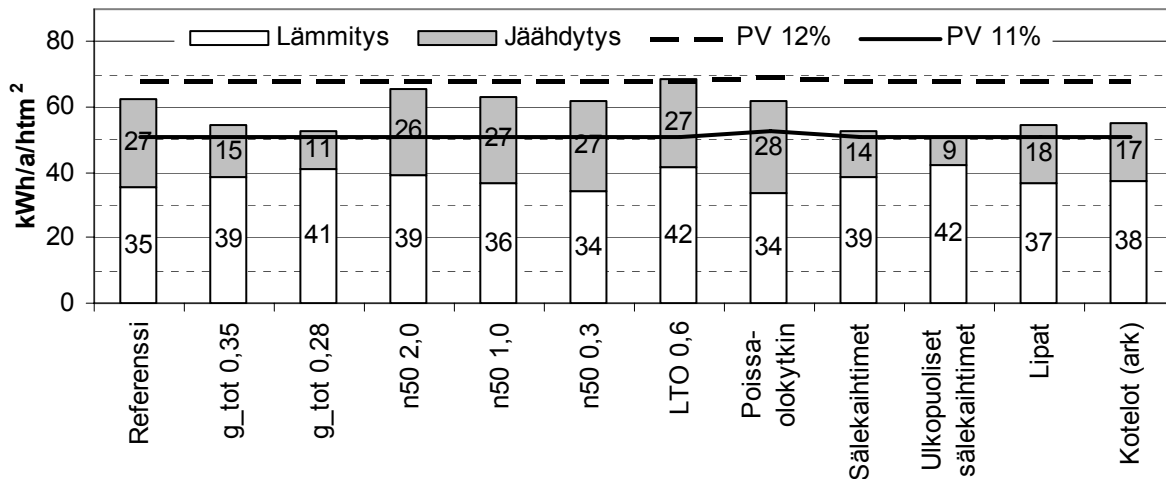
Helsingissä yhteenlasketut lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukset ovat välillä  $51 \dots 84 \text{ kWh/a/htm}^2$ . Lämmityksen osuudet vaihtelevat välillä  $41 \dots 83 \%$  ja jäähdytyksen  $17 \dots 59 \%$  yhteenlasketusta kulutuksesta. Referenssitapauksen yhteenlaskettu energiankulutus on  $62 \text{ kWh/a/htm}^2$ . Pienin kulutus saavutetaan referenssitapauksella yhdessä ulkoisten sälekaihtimien kanssa ja suurin kulutus ikkunoilla, joiden U-arvo on  $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Vaipan umpiosien referenssitapausta paremmalla eristystasolla ei saavuteta merkittäviä säästöjä: lämmitys- ja jäähdytysenergiakulutus laskee vain  $2 \dots 3 \%$ . Ikkunoiden tapauksessa referenssitasoa parempi U-arvo säästää kokonaisenergiankulutuksessa  $15 \%$ .

Rakennuksen tiiviyyden parantaminen referenssiarvosta arvoon  $0,3 \text{ l/h}$  ei vaikuta lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutukseen kuin  $1 \%$ . Ilmanvaihdon LTO:n huonontaminen  $60 \%$ :iin taas lisää energiankulutusta  $10 \%$  ja tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla energiankulutus pienenee vain  $1 \%$ . Auringonsuojauksella on huomattava merkitys energiankulutukseen: Auringonsuojaikkunoilla tai käyttämällä muita auringonsuojaustapoja yhteenlaskettu lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus pienenee  $12 \dots 18 \%$  referenssitapaukseen verrattuna.

Tarkasteltaessa eri vaihtoehtoja suhteessa nollaenergiatalotavoitteeseen nähdään, että kaikki muut ratkaisut paitsi referenssiä huonommat ikkunat ja huonoin ulkoseinävaihtoehto toteuttavat annetun ehdon, kun PV-paneelien tuotto vastaa  $12 \%$ :n hyötysuhdetta. Itse asiassa umpirakenteiden lämmöneristystasoa voitaisiin hieman heikentää referenssitasosta ja silti saavuttaa nollaenergiataso – erityisesti silloin, jos ikkunoiden U-arvoa sekä auringonsuojausta parannettaisiin parhaaseen vaihtoehtoon ja hyödynnettäisiin tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Tällöin ulkoseinän ja alapohjan U-arvoiksi riittäisi  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  sekä yläpohjan  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja järjestelmien hyötysuhteet huomioon ottaessa tilojen ja tuloilman lämmitysenergian kulutus olisi  $50 \text{ kWh/a/htm}^2$  ja jäähdytysenergian kulutus  $8 \text{ kWh/a/htm}^2$ .



Kuva 6. Tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus Helsingissä sekä nollaenergiatalon raja. Rakenteen perässä oleva merkintä on U-arvo.



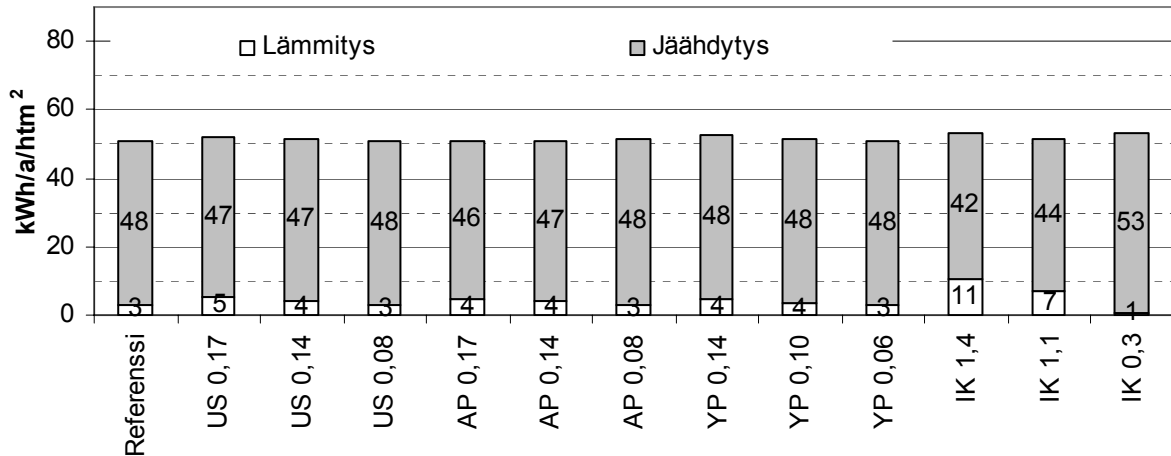
Kuva 7. Tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus Helsingissä sekä nollaenergiatalon raja.

Jos PV-paneelien tuotto onkin huonompi ja vastaisi hyötysuhdetta 11 % tai paneelien pinta-ala olisi pienempi, saa yhteenlaskettu lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus olla korkeintaan 51 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Silloin ainoastaan referenssitapaus varustettuna ulkopuolisilla sälekaihtimilla pääsee tavoitteeseen. Myös ikkunan g-arvon sekä U-arvon parantaminen ja muut ulkoiset auringonsuojausvaihtoehdot pääsevät hyvin lähelle nollaenergiatasoa. Pelkästään umpivaipan eristyksen tai tiiviyden parantaminen parhaalle mahdolliselle tasolle tai tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käyttäminen ei riitä tavoitteen saavuttamiseen.

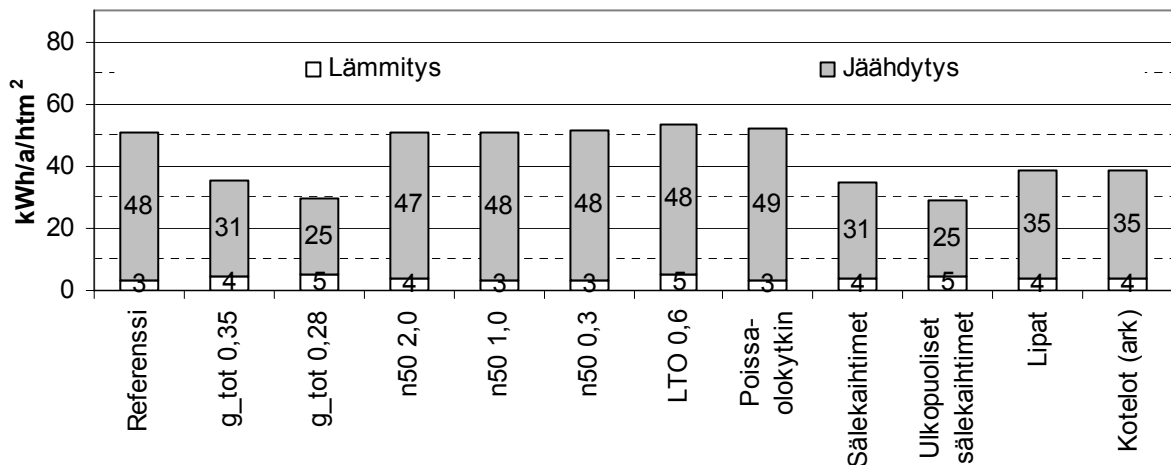
Yhtenä vaihtoehtona nollaenergiatason saavuttamisen varmistamiseen Helsingissä olisi lämpöpumppuratkaisujen käyttö lämmityksessä: Jos lämpöpumppuratkaisun, joka lämmittäisin vain tiloja, vuotuinen lämpökerroin olisi 2, saavutettaisiin kaikilla ratkaisuilla nollaenergiataso pois lukien huonoin ikkunavaihtoehto, vaikka PV-paneelien hyötysuhde olisi 11 %.

Kuvissa 8 ja 9 on esitetty vuotuiset tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukset, joissa on huomioitu lämmityksen ja jäähdytyksen hyötysuhteet, Madridissa. Kuviin ei ole piirretty vastaavia viivoja kuin kuvissa 6 ja 7, koska nollaenergiaraja on 209...210 kWh/a/htm<sup>2</sup> ilmanvaihdon ohjauksesta riippuen. Näin ollen kaikki laskentatapaukset täyttävät reilusti plusenergiatalotavoitteen: energiaylimäärä on 155...219 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Suurin energiaylimäärä saavutetaan käyttämällä ikkunoita, joiden g-arvo on 0,28, tai ulkoisia sälekaihtimia. Laskentatapauksen yhteenlasketut lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukset vaihtelevat välillä 29...53 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Madridissa lämmityksen osuus on hyvin pieni: suurimmillaankin vain 20 % ikkunoiden U-arvon ollessa 1,4 W/m<sup>2</sup>K.

Madridissa vaipan U-arvojen muutoksilla ei ole juurikaan vaikutusta yhteenlaskettuun lämmitys- ja jäähdytysenergiaan. Paremmat U-arvot pienentävät lämmitysenergian kulutusta, mutta samalla lisääntyy jäähdytysenergian kulutus, joka käytännössä kompensoi saavutetun lämmitysenergian säästön. Myöskään muutokset tiiviydessä, LTO:n lämpötilasuhteessa tai ilmanvaihdon ohjauksessa eivät juuri muuta yhteenlaskettua lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutusta suhteessa referenssitapaukseen. Sitä vastoin paremmalla ikkunoiden auringonlöpäisykertoimella sekä eri auringonsuojauskeinoilla voidaan pienentää huomattavasti jäähdytysenergian kulutusta referenssitapaukseen verrattuna: 13...23 kWh/a/htm<sup>2</sup>. Lämmitysenergia ei näissä tapauksissa kuitenkaan lisääny kuin 1...2 kWh/a/htm<sup>2</sup>.



Kuva 8. Tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus Madridissa. Rakenteen perässä oleva merkintä on U-arvo.



Kuva 9. Tilojen ja tuloilman lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus Madridissa.

Madridissa PV-paneelien hyötysuhde voisi olla noin 5 % tai paneelien pinta-ala voitaisiin lähes puolittaa ennen kuin plusenergiatalotavoite alkaisi vaarantua. Toisaalta umpirakenteiden eristystasoa voitaisiin huomattavasti heikentää ilman, että plusenergiataso vaarantuisi, jos PV-paneelien tuotto pysyisi ennallaan.

#### 4. Yhteenveto

Kahteen erilaiseen ilmastoon sovitettu rakennus on teoreettinen tapaus, mutta näin pystytään havainnollistamaan energiatehokkaiden ratkaisujen eroja Etelä- ja Pohjois-Euroopassa. Tuloksista nähdään, että sekä Helsingissä että Madridissa pystytään saavuttamaan halutut tavoitteet samalla rakennuksella. Tavoitteiden kannalta mitoittavaksi tekijäksi nousee Helsingin sääolot. Madridissa plusenergiatalotavoite on simulointitulosten perusteella helposti saavutettavissa kaikilla laskentavaihtoehdoilla, koska aurinkoenergiaa on tarjolla runsaasti. Helsingissä nollaenergiatalotavoite pystytään saavuttamaan melko vaivattomasti, jos PV-paneelit toimivat halutulla tavalla. Helsingissä tavoitteen saavuttaminen on kuitenkin melko herkkä PV-paneelien tuoton muutoksille. Tämä voi käytännössä tarkoittaa sitä, että nollaenergiatalotavoite ei

toteudu jokaisena vuonna. Tämän vuoksi Helsingin ilmastossa nollaenergiatalo tulee suunnitella niin, että laskennalliset tulokset ovat varmalla puolella eli plusenergiatalotasolla.

Helsingissä ja Madridissa ikkunoiden ominaisuudet ja niiden auringonsuojaus nousevat tärkeään asemaan. Tämä on seurausta siitä, että Luukku Housessa ikkunapinta-ala on huomattava suhteessa rakennuksen kokoon. Tulokset osoittavat, että myös Helsingissä on tärkeää käyttää ulkopuolisia auringonsuojia tai auringonsuojaikkunoita, jotta nollaenergiatalotavoitteen päästäisiin. Molemmissa tapauksissa myös eristystason nousu lisää jäähdytysenergian kulutusta.

Helsingin ilmastossa umpivaipan U-arvojen ei tarvitse olla viimeiseen asti vietyjä, vaan välillä 0,10...0,14 W/m<sup>2</sup>K arvot riittävät, jos ikkunoiden U-arvo on hyvin alhainen ja auringonläpäisy vähäinen, käytössä on ulkoiset auringonsuojat, rakennus on ilmatiivis sekä ilmanvaihdon LTO-laitteen lämpötilasuhde on 80 %. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että aurinkoenergiajärjestelmät toimivat hyvin. Ilmanvaihdon tarpeenmukaisuuden merkitys ei Luukku Housessa korostu, koska talo on kooltaan hyvin pieni.

Nollaenergiatason saavuttamista Helsingissä voidaan myös edesauttaa käyttämällä lämpöpumppujärjestelmää, jolla voidaan myös pienentää lämpimän käyttöveden tarvitsemää sähköenergiaa. Luukku House tullaankin varustamaan lämpöpumpulla. Lämminkäyttövesi nouseekin yhdeksi merkittäväksi tekijäksi erityisesti Helsingin ilmastossa, jossa ei pystytty tuottamaan läheskään kaikkea lämpimän käyttöveden lämmitysenergiantarpeesta aurinkokeräimillä. Tilannetta voitaisiin parantaa muuttamalla aurinkopaneelien ja –keräinten asennuskulma 10 asteesta noin 40 asteeseen, joka olisi optimaalisempi ratkaisu Helsingin sääoloissa. Tällöin esimerkiksi käyttöveden vuotuisesta lämmitysenergiantarpeesta todennäköisesti voitaisiin kattaa aurinkokeräimillä noin 50 %.

Tässä työssä ei ole tarkasteltu ikkunatuuletuksen, valaistuksen päivänvalo-ohjauksen eikä eristettyjen ikkunaluukkujen merkitystä. Niillä voi olla kuitenkin tavoitteiden saavuttamista helpottava vaikutus. Luonnollisesti myös sähkölaitteiden ja valaistuksen sähkönkulutus ja niissä tapahtuvat muutokset vaikuttavat lopputulokseen. Lisäksi Luukku Housessa on käytetty sisäverhouksessa levyä, joka sisältää PCM-materiaalia. Tämä siitä syystä, ettei rakennuksessa ole voitu käyttää massiivisia rakennusosia kuljetuksen vuoksi. Tulevaisuudessa onkin tarkoitus tehdä erilaisia mittauksia Luukku Housessa sekä Suomessa että Espanjassa, jotta saadaan parempaa ymmärrystä nolla- ja plusenergiatalojen suunnittelusta, rakentamisesta ja käytöstä.

## Lähdeluettelo

- [1] Solar Decathlon Europe 2010. Rules and Regulations. Draft 2.0. 2009-02-02.
- [2] Luukku House [WWW]. <http://www.sdfinland.com/>
- [3] IDA Indoor Climate and Energy [WWW]. <http://www.equa.se/eng.ice.html>
- [4] Juntunen, M. Expected energy outputs of PV-panels. Naps Systems 2009.

## **13. Matalaenergiarakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta**



# Rakennusprosessien kosteuden hallinta ja matalaenergiarakenteiden toimivuus

Ruut Peuhkuri, Tuomo Ojanen ja Jyri Nieminen  
VTT

## Tiivistelmä

Matalaenergiarakenteiden kosteusteknisen toimivuuden riittävä arviointi vaatii dynaamisia laskennallisia simulointeja tai testausta todellisissa ilmasto-olosuhteissa. Kastepisteanalyysiä tai vesihöyryn ajoittaista tiivistymistä kondenssiksi ei voi suoraan käyttää toimivuuden kriteereinä, koska jo nykyisellä eristetasolla ilmenee vähäistä kondenssia rakenteissa hygroskooppisen kosteuden seurauksena jopa ilman sisäilmasta tulevaa kuormitusta.

Erittäin hyvin eristettyjen puu-, teräs- ja betonirakenteiden toimivuutta on simuloitu ja testattu VTT:llä useiden vuosien ajan. Tulosten tarkastelu osoittaa että eristepaksuuden kasvu ei lisää kosteusongelmien riskiä verrattuna tyypillisiin vallalla oleviin rakenneratkaisuihin, olettaen että hyvän suunnittelun ja toteutuksen periaatteita on noudatettu käytännössä.

## 1. Johdanto

Tilojen lämmitys on Suomen rakennuskannan suurin energiankuluttaja. Suomen rakentamista koskevat uudet määräykset pienentävät uudistalojen tilojen lämmitysenergian tarvetta nykyiseen verrattuna noin kolmanneksella vuodesta 2010 alkaen. Jo nyt on rakenteilla taloja, joiden tilojen lämmityksen energiantarve on vain viidesosa tavanomaisten talojen lämmitystarpeesta. Rakennusten suunnittelun ja toteutuksen on oltava korkealaatuista, jotta matala energiankulutus saavutetaan. Esimerkkinä eräästä toteutuksen tason mittarista on rakennuksen ilmatiiviys. Tämä ei yksinään varmista kosteusteknistä toimivuutta, mutta on vahva indikaattori toteutuksen tasosta.

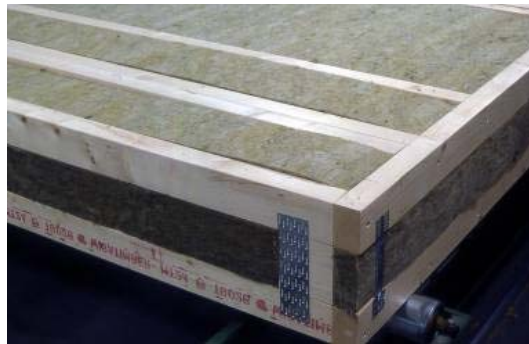
Julkisuudessa on herännyt keskustelu rakenteiden paksujen lämmöneristysten kosteusriskeistä, koska paksumman lämmöneristykseen odotetaan heikentävän rakenteiden kuivumiskykyä, aiheuttavan rakenteisiin kosteuden tiivistymisen mahdollistavia kastepisteitä sekä kosteus-, home- ja lahovaurioita. Kosteusvauriot ovat nykyrakentamisenkin ongelma, mutta vauriot johtuvat pääsääntöisesti laatu-ongelmista. Energiatehokas rakentaminen perustuu rakenteisiin ja ratkaisuihin, joiden toimivuus tunnetaan. Toimivien rakenteiden periaatteet on tunnettu jo kauan.

Viimeisten parinkymmenen vuoden aikana VTT:llä kerätyn kokemuksen mukaan sadeveden pääsy rakenteisiin, märkätilojen riittämätön vedeneristys, putkistojen vuodot, vedenpoistojen tukkeutumiset, maakosteuden pääsy rakenteisiin ja sisäilman pitkäaikainen vuotovirtaus rakenteiden läpi ovat tavallisimpia syitä, jotka aiheuttavat rakenteiden kosteusongelmia [1 - 3]. Syynä näihin perustuvanlaatuisiin ongelmiin ovat mm. huono toteutuksen ja suunnittelun laatu, rakennusaikaisen kosteudensuojauksen vastuukysymykset, ajattelemattomuus, asenteet ja käsillä olevien ongelmien olemassaolon kieltäminen.

## 2. Matalaenergiarakenteiden toimivuus käytännössä

### 2.1 Seurantakohteita monien vuosien takaa

Espooseen rakennettiin vuonna 1991 puurakenteinen matalaenergiapientalo (kuva 1 ja taulukko 1), jonka tavoitteena oli osoittaa mahdollisuudet rakennuksen energiatehokkuuden parantamiseksi kustannustehokkaasti [13; 14]. Tavoitteena oli rakennus, jonka tilojen lämmityksen energiankulutus on vain puolet ajankohdan tavanomaiseen rakentamiseen verrattuna. Rakennuksen lämmöneristystaso vastaa vuoden 2010 lämmöneristysmääräysten tasoa. Seinän U-arvo on kuitenkin rakentamismääräysten tasoa parempi,  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Kuva 1. Espooseen 1991 rakennetun matalaenergiapientalon ulkoseinä on puurakenteinen. Seinä koostuu naulalevyillä sidotuista  $45 \times 70 \text{ mm}$  runkorakenteesta. Seinän eristyspaksuus on  $300 \text{ mm}$ .

Rakennuksen energiankulutusta ja rakenteiden toimivuutta seurattiin kahden talvikauden yli ulottuvilla mittauksilla. Seurantamittauksilla selvitettiin rakennuksen tilojen ja käyttöveden lämmittämisen energiankulutusta sekä kotitaloussähkön kulutusta jaettuna eri kulutuskohteisiin. Rakennuksen ja sen rakenteiden toimivuutta tutkittiin painekokeiden ja lämpökuvausten sekä kosteus- ja lämpötilamittauksin. Taulukossa 1 on esitetty talon teknisiä ratkaisuja.

Pietarsaaren asuntomessuille 1994 rakennettu IEA5-talo (kuva 2 ja taulukko 1) on yhä yksi Suomen energiatehokkaimmista rakennuksista. Tavoitteena oli rakentaa pientalo, jonka ostetun energian kulutus minimoidaan käyttämällä ajankohdan uusinta kaupallisesti saatavilla olevaa teknologiaa. Samalla rakennus kattaa osan energiantarpeestaan aurinkolämmöllä ja – sähköllä.



Kuva 2. Aurinkotalo IEA5 rakennettiin 1993 – 1994 ja esiteltiin yleisölle Pietarsaaren asuntomessuilla 1994. Rakennuksen ostetun energian kokonaiskulutus on vain  $48 \text{ kWh/m}^2$ .



Rakennus on puurakenteinen. Rakennuksen energiankulutusta ja rakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta tutkittiin 3 vuotta kestäneellä seurantatutkimuksella. Rakenteiden toimivuutta mitattiin 200 lämpötila- ja kosteusanturin, painekokeiden ja lämpökuvauksen avulla. Seurannan jälkeen rakennuttajan kanssa on vuosittain käsitelty rakennuksen ja rakenteiden toimivuuteen liittyviä kysymyksiä.

Taulukko 1. Esimerkkirakennusten ominaisuuksia verrattuna vuoden 2010 määräyksiin.

	Rakentamis- määräykset 2010	Matalaenergiata- lo, Espoo	IEA5 Pietarsaari
Lämmöneristys, W/m <sup>2</sup> K			
Ulkoseinä	0,17	0,14	0,12
Yläpohja	0,09	0,09	0,09
Alapohja	0,16	0,19	
Ikkuna	1,0	1,2	
Ovi	1,0	1,2	
Ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhde, %	50	75	75
Ulkovaipan ilmavuotoluku, n <sub>50</sub> , h <sup>-1</sup>	2 – 4	1,2	0,8

Taulukossa 2 on esimerkkirakennusten rakenteiden kosteusmittausten perusteella saatujen kosteusvaihteluiden ääriarvot kahden kokonaisen seurantavuoden ajalta. Kummankin rakennuksen ulkovaipan puurakenteiden kosteudet olivat kosteusteknisesti turvallisella tasolla eikä rakenteisiin havaittu vuositasolla kertyvän lisääntyvää kosteutta.

Espoon matalaenergiatalon yhdestä ulkonurkasta mitattiin ensimmäisen seurantavuoden aikana kohonneita kosteuspitoisuuksia. Kohonnut kosteus johtui kuitenkin rakennusaikaisesta kosteudesta, sillä toisen seurantavuoden aikana vastaavaa kosteuden kohoamista ei tapahtunut.

Pietarsaaren IEA5-talon ulkoseinien kosteudet ovat jonkin verran Espoon matalaenergiataloa matalammalla tasolla. IEA5-talon ulkoseinän tuulensuojavillan vaikutuksesta runkorakenteiden lämpötila on talvella Espoon taloa korkeampia ja suhteellinen kosteus matalampi.

Tulosten perusteella ulkoseinien kosteudet seuraavat ulkoilman kosteus- ja lämpötilavaihteluita. Rakennuksen sisäilmasta ei synny rakenteisiin merkittävää kosteusrasitusta. Siksi rakenteen lämmöneristystasolla ei ole vaikutusta rakenteiden kosteustilaan. Toimivuuden edellytyksenä on rakentamisen hyvä laatu. Tämä tarkoittaa rakenteen suojaamista sateelta toimivilla julkisivuratkaisuilla ja sisäilman kosteusrasitukselta kunnollisella höyryn- ja ilmansululla.

Matalaenergiatalon ilmavuotoluku (n<sub>50</sub>) 1 h<sup>-1</sup> on rakennuksen tilojen lämmitysenergian tarpeen kannalta jo riittävä. Kosteustekninen varmuus kuitenkin kasvaa, kun ilmavuotoluku paranee. Passiivitalolta edellytetään mitattua ilmavuotolukua 0,6 h<sup>-1</sup> tai sitä pienempää arvoa. Tämä on mahdollista saavuttaa huolellisen suunnittelun ja toteutuksen avulla. Suomeen rakennettujen passiivitalojen mitatut ilmavuotoluvut ovat vaihdelleet 0,09 ja 0,57 h<sup>-1</sup> välillä. Mäntyharjulle 2009 rakennetun passiivitalon ilmavuotoluku oli vain 0,09 1/h. Tämä saavutettiin kehittämällä helposti asennettavat ulkovaipparakenteet ja tarkastelemalla koko rakennusprosessia juuri ulkovaipan hyvän lämpöteknisen laadun saavuttamisen näkökulmasta.

Pietarsaaren IEA5-talo on ryömintätalaperusteinen. Ryömintätilan ilman suhteellinen kosteus on ajoittain kohonnut 100 %:n suhteelliseen kosteuteen lähinnä kosteina ja lämpiminä kesäpäivinä. 15 vuoden käyttökokemuksen perusteella lattian alapinnassa ei ole havaittu merkkejä homeen

kasvusta, mikä kertoo siitä, että kosteusrasitus on ollut lyhytkestoista. Ryömintätilan pohjana on paksu sepelikerros. Maapohja sepelikerroksen alla on viileämpi kuin ryömintätilan ilman lämpötila keskikesällä, jolloin kosteusvirta suuntautuu ryömintätilan maapohjaan. Talvella ryömintätila on lämpimämpi kuin ulkoilma, jolloin tuuletus poistaa tehokkaasti maasta ryömintätilan ilmaan siirtyvää kosteutta.

Taulukko 2. Rakenteiden suhteellisen kosteuden vaihtelut kahden seurantavuoden aikana.

	Matalaenergiatalo Espoo Suhteellinen kosteus, %		IEA5, Pietarsaari Suhteellinen kosteus, %	
	1. vuosi	2. vuosi	1. vuosi	2. vuosi
Ulkoseinät	60 - 90	60 - 90	50 - 80	50 - 80
Ulkonurkat	60 - 98	60 - 85	-	-
Ryömintätila ilma	-	-	60 - 100	60 - 100
Alapohjan puurakenteet	-	-	< 60	< 60

## 2.2 Laskentaesimerkki rakenteiden toimivuudesta

Seuraavassa on esimerkkinä käytetty Valkeakosken passiivitalo Lupauksen rapattua julkisivurakennetta, kuvat 3 ja 4. Laskenta on tehty sekä kuvan 3 mukaiselle hyvineristetylle rakenteelle että vertailurakenteelle, joka juuri täyttää nykyisten rakentamismääräysten ulkoseinän U-arvovaatimukset eli  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Eristeenä on käytetty kivivillaa. Laskentamallina käytettiin Wufi 4.1:tä, ja simulointi tehtiin kolmelle peräkkäiselle vuodelle, joista viimeisen vuoden olosuhteita on käytetty tuloksissa ja homeindeksin laskennassa. Kokemuksen mukaan tämän tyyppisissä rakenteissa riittää kolmen vuoden dynaaminen simulointi, jotta päästään ns. kvasi-staattiseen tilanteeseen, jossa olosuhteet vuodesta toiseen muuttuvat samalla tavalla.

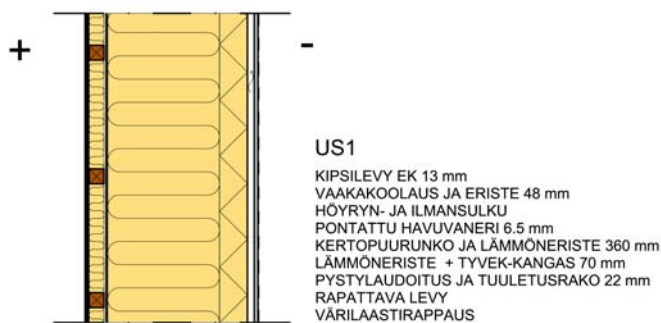
Laskennan lähtötiedot ja oletukset olivat:

- Pintakertoimet:
  - Lämpö: normaalit kertoimet
  - Säteilykertoimet: absorptio 0,4, emissio 0,9 (=vaalea rappaus)
  - Kosteus:  $Sd_{ulko} = 0\text{m}$  (ei pinnoitetta),  $Sd_{sisä} = 3\text{m}$
- Normaalit oletukset viistosateesta: alle 10m korkea rakennus
- Säätiiedot: Helsinki
- Sisäilma: normaali kosteuskuorma,  $20 \text{ }^\circ\text{C} < T < 25 \text{ }^\circ\text{C}$

VTT:llä kehitetty homekasvun laskennallinen simulointimalli kuvaa homeen kasvua tarkastelukohdan vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa [4 – 6]. Homeen kasvu esitetään homeindeksin (arvot 0...6) avulla. Homeindeksi on laskettu valituille rajapinnoille, jotka ovat kokemuksen mukaan kriittisimpiä homeen kasvun kannalta eli paikkoja, joissa olosuhteet ovat otollisimpia homeelle. Näitä ovat tyypillisesti ulkorappauksen ja eristeen rajapinta, tuuletetun rakenteen tuulensuojan takana ja tuuletetun puujulkisivun takapuoli. Homeindeksi on laskettu "worst case" scenarion mukaan eli olettaen, että materiaalin homeutumisherkkyys vastaa homeelle herkkää käsittelemätöntä männyn pintapuuta. Tämä oletus kuvaa kohtuullisen hyvin riskiä, mikä pitkään rakenteessa olleella, muiden materiaalikerrosten ja rakenteen läpäisevien ilmavirtausten vaikutuksesta likaantuneella materiaalipinnalla on homehtua.



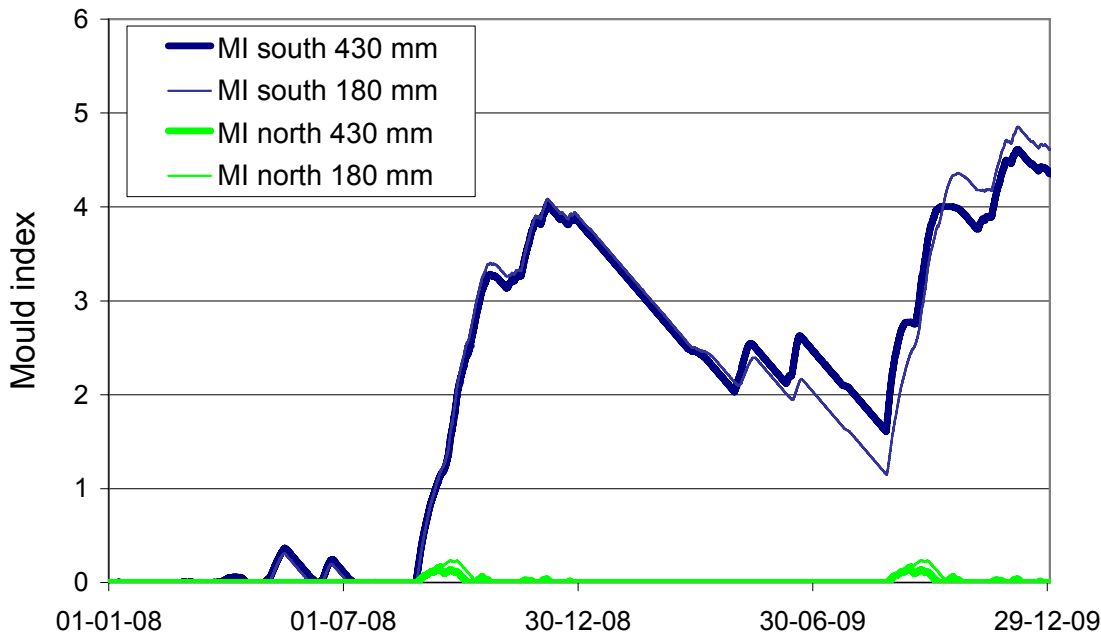
Kuva 3. Passiivitalo Lupaus (kuva: Jari Kiuru).



Kuva 4. Passiivitalo Lupauksen ulkoseinärakenne. Seinän kokonaiseristyspaksuus on 478 mm ja U-arvo  $0,086 \text{ W/m}^2\text{K}$ . (Kuvat Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas).

Laskennassa rakenteen julkisivu oletettiin tuulettumattomaksi. Tuulettamattoman rakenteen rappauksen ja lämmöneristeen rajapinnan homehtumisherkkyys (homeindeksin kehitys, kuva 5) ei kuitenkaan vastaa todellisuuden mukaista homehtumisherkkyyttä. Tavoitteena oli tässä esimerkissä kuvata **lämmöneristykseen paksuuden vaikutusta** homeindeksiin, joten laskennassa pyrittiin suureen homeindeksin arvoon tapauskohtaisten erojen löytämiseksi.

Tästä rakenteesta voidaan siis oheisilla oletuksilla ja rakennusfysiisen laskennallisen analyysin perusteella sanoa, että homeriski on suurin eteläseinällä. Laskennallinen homeen kasvu oli jokseenkin samankaltainen vahvasti eristetyllä rakenteella kuin nykyisten rakennusmääräysten mukaisesti eristetyllä. Ohuempi 180 mm lämmöneristys johti hieman suurempaan hetkelliseen homeindeksiin tarkastelukohdassa kuin paremmin eristetty. Huomattavaa on, että homeriskin kannalta leuto Helsingin ilmasto on kriittisempi kuin mitoitukseen yleisesti käytettävä Jyväskylän ilmasto.



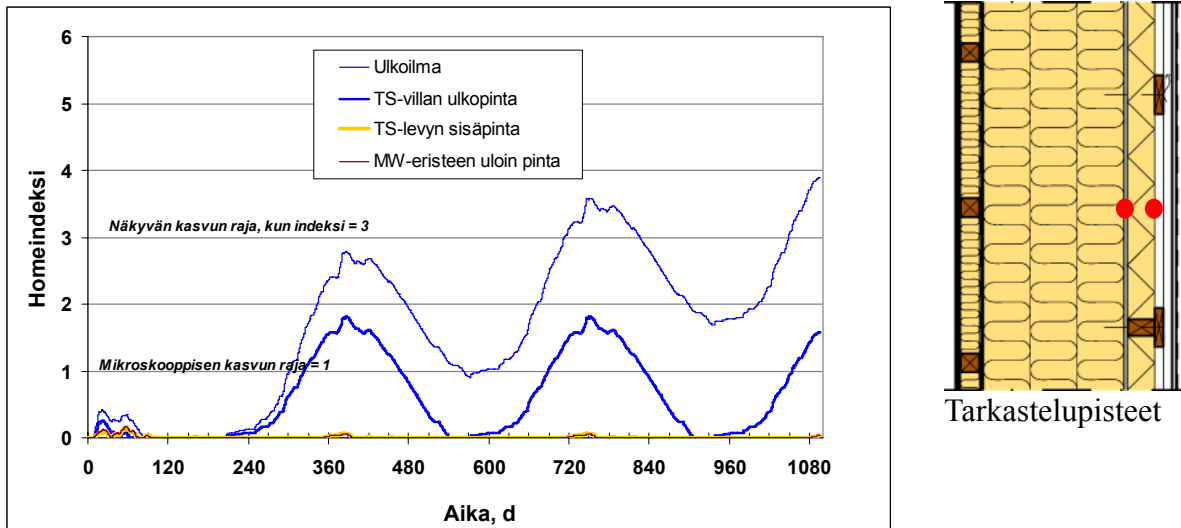
Kuva 5. Laskennallinen homeindeksi rapatulle ulkoseinärakenteelle sekä etelä- että pohjoisjulkisivulle Helsingin ilmastossa. Käyrien nimissä summittainen eristepaksuus. Ylemmät, tummemmat käyrät koskevat eteläjulkisivua.

### 2.3 Ilmanvaihdon merkitys – sekä sisällä että rakenteissa

Rakennusten riittävä ilmanvaihto on hyvän sisäilman tae, eikä sen pienentäminen energiatehokkuuden perusteella ole tarkoituksenmukaista. Ilmanvaihdolla on merkitystä myös rakenteiden kosteuden kannalta. Riittävä ilmanvaihto kuljettaa pois asumisesta syntyvää kosteutta. Lämmön talteenotto ilmanvaihdosta on tärkeä energiatehokkuutta parantava tekijä.

Kaikkien julkisivuratkaisujen tulee olla sateenpitäviä. Siksi niiden yksityiskohtaiset ratkaisut tulee suunnitella ja toteuttaa huolellisesti. Vaikka ilmastonmuutos muuttaisikin Suomen ilmaston sateisemmaksi, energiatehokas talo ei ole tavanomaista riskialttiimpi.

Jo nyt julkisivut kärsivät lievistä homeongelmista. Vauriot ovat jossain määrin lisääntyneet, koska maaleista on vähennetty homeen kasvua hidastavia, ympäristölle haitallisia aineita. Oheinen kuva 6 havainnollistaa ulkoilman lämpötilan ja kosteuden vaikutuksen homeen kasvuun sekä rakenteessa että ulkoilman olosuhteissa. Homeen potentiaalinen esiintymisriski on rakennetta ympäröivissä luonnon ilmasto-oloissa huomattavasti suurempi kuin itse rakenteessa [6]. Rakenteissa, jotka on suunniteltu ja toteutettu oikein, tämä riski on huomattavasti pienempi kuin ulkoilman oloissa [3; 9]. Puujulkisivujen homeenkasvu ei siis lisäännä eristyspaksuuden kasvamisen takia. Edes puujulkisivun puutteellisen tuuletuksen ei ole havaittu lisäävän julkisivun home-riskiä.



Kuva 6. Homeindeksin vaihtelu ulkoilmassa olevassa puussa ja rakenteen eri kerroksissa.

### 3. Rakennusprosessin kosteuden hallinta

Rakennusmateriaalien ja rakenteiden kosteus voi olla rakennuskosteutta tai käytön aikana rakenteisiin pääsystä kosteutta. Rakennuskosteus tarkoittaa rakenteisiin ja materiaaleihin kuljetusten, varastoinnin tai rakentamisen jäljiltä jäänyttä kosteutta. Kosteuden vaikutukset rakenteisiin ja materiaaleihin riippuvat materiaalien ja rakenteiden kosteudenkestävyydestä ja rakenteiden toimivuudesta.

Sadeveden pääsy rakenteisiin, rakennuskosteus, putkivuodot ja märkätilojen vedeneristyksen puutteet aiheuttavat valtaosan rakenteiden kosteusvaurioista. Nämä ovat seurausta rakennusvirheistä ja rakenteiden ja materiaalien vanhenemisesta sekä usein myös huollon ja kunnossapidon puutteista. Muiden tekijöiden merkitys on oikein toteutetuissa rakenteissa hyvin pieni. Väärät rakenneratkaisut, huono suunnittelu ja työn laatu kuitenkin lisäävät kosteusriskiä rakennuksen käytön aikana myös nykyrakentamisessa.

Kiinnostus matalaenergia- ja passiivitalojen rakentamiseen on kasvanut voimakkaasti. Mitä pienempään energiantarpeeseen pyritään, sitä merkittävämpi vaikutus on suunnittelun ja rakentamisen huolellisuudella. Toisin sanoen passiivitalon hyvää energiatehokkuutta ei saavuteta, jos rakentamisprosessissa on puutteita. Rakennuksen pääsuunnittelijalla ja työmaan vastaavalla mestarilla on tärkeä asema rakentamisen hyvän laadun savuttamisessa.

Ulkovaipan ilmanpitävyys on keskeinen tunnusluku, jolla rakentamisen teknistä laatua voidaan arvioida. Pääsuunnittelijan on huolehdittava siitä, että rakennuksen ulkovaippa on rakennettavissa ilmanpitäväksi. Työmaan vastaavan mestarin on huolehdittava siitä, että rakennus rakennetaan suunnitelmien mukaisesti. Suurissa rakennuksissa valvonta käsittää myös urakoitsijoiden oman valvonnan, mikä on erityisen tärkeää kohteissa, joissa rakentaminen on jaettu useisiin aliurakoihin. Urakkarajoille keskittyviä ongelmia ei muuten voida välttää.

### 4. Simuloinnin käyttö suunnittelussa

Dynaamiset simulointityökalut antavat ulkovaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta realistisemmän ja luotettavamman kuvan kuin perinteiset käsinlaskentaan perustuvat menetelmät, kuten kastepisteanalyysi Glaserin mukaan. VTT:n simulointityökaluilla

TCCC2D [7] ja LATENITE sekä muutamilla kaupallisilla työkaluilla kuten saksalaisilla Wufi Pro -ohjelmilla voidaan tarkastella 1-, 2- tai 3- ulotteisia rakenteita. Simulointien tuloksena saadaan muun muassa suhteellisen kosteuden vaihtelut rakenteen eri osissa sekä toimivuuden kriteereinä esimerkiksi homeindeksi homeriskin arvioimista varten, puurakenteiden lahoriski, märkäaika (TOW time of wetness eli lämpötila yli 0°C ja suhteellinen kosteus yli 80 %) teräsrakenteiden korroosioriskin arvioimista varten sekä betonirakenteiden hydratoitumisen arviointi [2; 8 – 10]. Simuloinnin tuloksia voidaan tukea laboratorio- ja kenttämittauksilla.

Erittäin hyvin eristettyjen puu-, teräs- ja betonirakenteiden toimivuutta on simuloitu ja testattu VTT:llä useiden vuosien ajan. Esimerkkejä tarkastelluista ilmasto-olosuhteista ovat Helsinki, Jyväskylä ja Sodankylä, St.Hubert Belgiassa, Bergen Norjassa ja Moskova Venäjällä. Tulokset osoittavat, että eristepaksuuden kasvu ei lisää kosteusongelmien riskiä verrattuna tyypillisiin rakenneratkaisuihin, olettaen että hyvän suunnittelun ja toteutuksen periaatteita on noudatettu.

#### 4.1 Simulointi suunnittelun ja mitoituksen apuna

Rakenteeseen laskennallisesti muodostuvaa kastepistettä ei voi käyttää sinällään kosteusvaurioiden mittarina. Ulkovaipan rakenteisiin muodostuu lämpötilan sekä sisä- ja ulkoilman kosteuserojen johdosta kastepisteitä. Ne ovat kuitenkin ajoittaisia ja kosteusriskien kannalta merkityksettömiä. Rakenteiden home-, mikrobi- tai lahovauriot johtuvat homeen tai mikrobien kasvun mahdollistavan lämpötilan ja kosteuden ja näiden ajallisen keston yhteisvaikutuksesta.

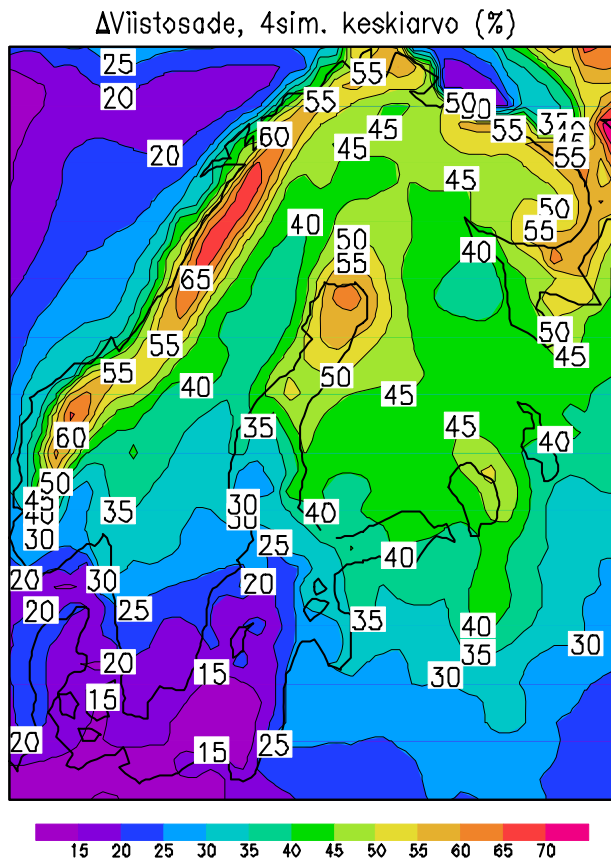
Rakenteiden toimivuutta tulee tarkastella näiden kolmen tekijän – lämpötilan, kosteuden ja ajan – muodostaman homeindeksin perusteella. Paksu lämmöneristys muuttaa rakenteiden uloimpien osien lämpötiloja verrattuna tavanomaisiin lämmöneristyspaksuuksiin. Muutokset eivät ole rakenteiden toimivuuden kannalta kuitenkaan merkittäviä. Puuseinän lämmöneristyspaksuuden kasvattaminen 20 senttimetristä kaksinkertaiseksi ei lisää rakenteen homeriskiä.

#### 4.2 Simuloinnin vahvuudet ja heikkoudet

Numeerinen simulointi on hyvä apuväline kuvaamaan rakenteiden toimintaan vaikuttavia tekijöitä ja arvioitaessa toimivuuden herkkyyttä eri tekijöiden suhteen. Esimerkiksi rakenteiden kuivumiskyky on olennaisen tärkeä toimivuuteen liittyvä tekijä. Laskenta kuvaa kuitenkin ideaalista maailmaa: Materiaaliominaisuudet ja materiaalikerrosten rajapintojen käsittely on yleensä ajan suhteen muuttumaton ja satunnaiset kuormitustekijät on oletettava. Todellisuudessa rakenteiden ikääntymisen aiheuttamat muutokset ja osittain tästäkin johtuvat satunnaiset kuormat voivat olla ratkaisevia tekijöitä toimivuuden kannalta. Laskennan, kokeellisen toimivuuden ja kenttäkohteissa saadun asiantuntemuksen yhdistäminen varmistaa parhaiten todellisten riskitekijöiden kartoituksen ja rakenteiden toimivuuden ennakoinnin [1 – 3; 10].

#### 4.3 Ilmastonmuutos ja rakenteiden toimivuus

Ilmastonmuutoksen seurauksena Pohjolan sääolojen oletetaan muuttuvan (kuva 7). Selvitysten mukaan vuosisadan loppuun mennessä [11; 12] lyhyen ajan (6 h ja 5 d) sademaksimit kasvavat Suomessa keskimäärin 25 - 50 %. Merkittävää myrskyjen voimistumista ei tapahdu, mutta niiden todennäköisyys kasvaa ja siten viistosateet lisääntyvät huomattavasti myös talvikaudella, jolloin minimilämpötilat kasvavat ja pakkasjaksoit lyhenevät. Useimmat näistä tekijöistä vaikuttavat heikentävästi useimpien rakennusmateriaalien ja erityisesti puurakenteiden [8; 9] kestävyYTEEN.



Kuva 7. Ilmastomallisimuloinneista (neljän 30 v. simulointivertailun keskiarvo) ennakoitu muutos tämän vuosisadan aikana keskimääräisessä vuoden viistosateen määrässä (%) [12].

Ilmastonuutos ja kasvavat ulkopuoliset kosteuskuormat eivät kuitenkaan aiheuta ongelmia ainoastaan hyvin eristetyille rakenteille ja matalaenergiataloille vaan kaikille rakennuksille ja niiden vaipparakenteille. Erilaisten skenaarioiden laskennallinen simulointi auttaa luomaan mahdollisimman totuudenmukaisen kuvan rakenteiden toimivuudesta tulevaisuuden ilmastossa. Erityisesti simulointia voidaan käyttää paljastamaan rakenneratkaisujen heikkoja lenkkejä, jossa pienikin muutos olosuhteissa aiheuttaa merkittävän toimivuuden vähenemisen.

## 5. Yhteenveto

Rakennusten ja rakennetun ympäristön energiatehokkuuden parantaminen on tärkeä keino hillitä ilmastonmuutosta. Rakennusten energiatehokkuus tarkoittaa energian vähäistä käyttöä hyvän, terveellisen ja viihtyisän sisäympäristön ylläpitämiseksi. Rakentamisessa energiatehokkuus edellyttää nykyistä paremmin lämmöneristettyjä taloja, energian tehokkaan käytön takaavaa talotekniikkaa sekä hyvää rakentamisen laatua. Myös rakennuksen käyttäjä vaikuttaa energian kokonaiskulutukseen. Osaava asuminen pienentää energialaskua.

Keskeistä energiatehokkaassa rakentamisessa on laatu koko rakentamisprosessissa. Laadun parantaminen on myös rakennuttajan asia. Hyvää laatua ei välttämättä saavuteta hintakilpailulla tai rakentamiseen liittyvien vastuukysymysten väistämällä. Toimivuus tulisi nostaa myös kilpailuttamisen tärkeäksi kriteeriksi.

## Lähdeluettelo

- [1] Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet. VTT Tiedotteita - Research Notes : 2168. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2168.pdf>. 2002. VTT Rakennustekniikka, Espoo. 66 s. + liitt. 3 s.
- [2] Ojanen, T.; Kohonen, R. Numerical simulation of heat, air and moisture transfer in building structures. Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components. Models and Transfer Properties. Paris, France, 9 - 11 Jan. 1995. BRI, CSTB. 1995, 221 – 239
- [3] Tutkimuselostus Nro VTT-S-10816-08. Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=96145&lan=fi>. 2008. 21 s. + liite 1 s.
- [4] Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report no 221. 40 p + app. 9 p.
- [5] Hukka, A, and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology. 33 (6) 475 - 485.
- [6] Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Numerical simulation of mould growth in timber frame walls. Healthy Buildings 2000. Espoo, FI, 6 - 10 Aug. 2000. Seppänen, O. & Säteri, J. (Eds). Vol. 3: Microbes, Moisture and Building Physics. Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate (FiSIAQ). Espoo (2000), pp. 335 – 340
- [7] Ojanen, Tuomo; Kohonen, Reijo; Kumaran, Modeling heat, air and moisture transport through building materials and components. Moisture Control in Buildings. Ed. H.R. Trechsel. ASTM American Society for Testing and Materials. Philadelphia (1994), 18 - 34
- [8] Viitanen, Hannu; Ritschkoff, Anne-Christine; Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Moisture conditions and biodeterioration risk of building materials and structure. Proceedings of the 2nd International Symposium ILCDES 2003 Integrated Life-time Engineering of Buildings and Civil Infrastructures, Kuopio, 1-3 Dec. 2003. RIL, VTT, CIB, RILEM, IABSE, ECCE, ASCE. Espoo (2003), 151 - 156
- [9] Viitanen, H., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Toratti, T. & Makkonen, L., 2008: Service life of wooden materials - mathematical modelling as a tool for evaluating the development of mould and decay. COST E37 Final Conference "Socio-economic perspectives of treated wood for the common European market", Bordeaux, 2008, 12 s.
- [10] Simonson, C.J.; Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Moisture performance of an airtight, vapor-permeable building envelope in a cold climate. Journal of Thermal Envelope and Building Science. Vol. 28 (2005) No: 3, 205 - 226
- [11] Makkonen, L., Ruokolainen, L., Räisänen, J. & Tikanmäki, M., 2007: Regional Climate model estimates for changes in Nordic extreme events. Geophysica, 43 (1-2): 19 - 42.
- [12] Makkonen, Lasse; Tikanmäki, Maria. Poikkeukselliset luonnonilmiöt ja rakennettu ympäristö muuttuvassa ilmastossa. VTT 2008. [http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT\\_R\\_10419\\_08.pdf](http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT_R_10419_08.pdf). 26 s.
- [13] Nieminen, Jyri; Kouhia, Ilpo; Haakana, Maarit; Pulakka, Sakari. Matalaenergiapientalon energiankulutus ja säästötoimenpiteiden kannattavuus. 1994. VTT, Espoo. 19 s. + liitt. 9 s.
- [14] Nieminen, Jyri; Kouhia, Ilpo; Heimonen, Ismo. Matalaenergiapientalo 50 %. Koetalotutkimus. VTT, rakennusmateriaalilaboratorio. ETRR-tutkimusohjelma. Raportti 18. Espoo (1992), 39 s. + liitt. 7 s
- [15] Kouhia, Ilpo; Nieminen, Jyri. IEA5 solar house. 1995. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes : 1674. VTT, Espoo..38 p. + app. 2 p



# Lämmöneristykseen lisäyksen vaikutuksia rakenteiden käytännön toteutukseen

Jukka Lahdensivu  
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

## Tiivistelmä

Siirryttäessä nyky määräysten mukaisesta rakentamisesta matalaenergiatasoon lämmöneristeiden paksuus kasvaa seinissä noin 260-280 mm:iin ja yläpohjissa noin 450-500 mm:iin, kun asiaa tarkastellaan samantyyppisillä mineraalivillaeristeillä, joita nykyisinkin käytetään. Näin merkittävästi eristepaksuuksien kasvamisella tulee olemaan suuri vaikutus siihen, miten rakenteet käytännössä toteutetaan. Harvoissa rakennetyypeissä eristyspaksuutta voidaan kasvattaa näin merkittävästi ilman, että rakennetyyppiin on tehtävä oleellisia muutoksia joko jo suunnitteluratkaisun tasolla tai valmistus- ja asennustekniikoiden suhteen etenkin, jos rakennusosien kustannustehokkuus halutaan pitää hyvänä. Tässä artikkelissa pohditaan energiamääräysten kiristämisen vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan sekä rakenteiden paksuuntumisen vaikutuksia liitosten ja rakennusosien suunnitteluun ja toteutukseen.

## 1. Johdanto

Vuoden 2010 alusta rakennuslupaa vaativissa rakennuksissa rakenteiden lämmöneristysmääräykset ovat nykyistä selvästi tiukemmat. Myös rakennusten energialuokitus asettaa lisävaatimuksia mm. rakenteiden tiiviydelle, mikäli halutaan saavuttaa keskimääräistä parempia energialuokkia.

Edellä mainitut asiat aiheuttavat lukuisia muutoksia nykyisin käytössä oleviin rakenneratkaisuihin ja liitoksiin sekä käytettäviin materiaaleihin ja työtapoihin aikatauluineen. Tässä artikkelissa pohditaan energiamääräysten kiristämisen vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan sekä rakenteiden paksuuntumisen vaikutuksia liitosten ja rakennusosien suunnitteluun ja toteutukseen. Lähtökohtana on teollinen rakentaminen, joten fokuksessa ovat kerros- ja rivitalot.

Perinteisesti rakenteiden suunnittelu on tehty lujuusmitoituksena ja kaikki muut asiat on sitten ratkaistu ”kuten ennenkin”, eli kokemuksesta on tiedetty palo-, ääni-, lämmöneristys jne. asioiden täyttyvän, kun rakenteet ja rakennusosat on valittu ”perinteisiksi”. Nyt, kun rakenteiden dimensiot muuttuvat, tullaan ottamaan käyttöön uusia tuotantotekniikoita sekä muutetaan satoja muita asioita yhtä aikaa, vaaditaan rakennesuunnittelijoilta hyvää suunnitteluosaamista myös ääni-, palo- ja lämpötekniikassa perinteisen lujuusmitoituksen lisäksi.

## 2. Rakennusten energiankulutuksen vähentäminen

Ilmastonmuutoksen ehkäisemisen tai hidastamisen kannalta on ilmeistä, että uudisrakennusten energiatehokkuuden parantaminen rakennusten vaippojen lämmöneristystä lisäämällä on saavutettavaan energiansäästövaikutukseen nähden suhteellisen kallis ja hidas tapa. Merkittävästi tehokkaampia toimenpiteitä olisi todennäköisesti löydettävissä mm. asumisesta, teollisuudesta ja

liikenteestä. Esimerkiksi julkaisussa *Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys [1]* mukaan rakennusten toteutuneessa energiankulutuksessa oli viisinkertainen ero, vaikka näissä kaikissa taloissa oli rakenteiden U-arvot likimain samat. Eniten kuluttava kulutti siis viisi kertaa enemmän energiaa kuin vähiten kuluttava, vaikka vaipan lämpöhäviön voi otaksua olevan likimain yhtä suuren kaikissa rakennuksissa. Tämän taustalla on se, että rakennusten käytön vaikutus energiankulutukseen on vaikutukseltaan moninkertainen rakenteiden energiatehokkuuteen nähden.

Myös rakentamisessa energiatehokkuuden parantaminen tulisi kohdentaa niihin toimiin, jossa investoinneista saadaan suurin hyöty. Esimerkiksi kerrostalojen ulkovaipan läpi tapahtuva lämpöhäviö on jo nykyisillä U-arvoilla enää vain noin 15 % rakennuksen kokonaislämpöhäviöistä. Yläpohjan osuus on kerrostaloissa vain muutaman prosentin luokkaa. Vastaavasti ilmanvaihdon energiankulutus on luokkaa 30 %. Tästä syystä ilmanvaihdon kautta on saavutettavissa huomattavasti suurempi säästö LTO:n hyötysuhteen tehostamisen ohella vaikuttamalla esim. ilmanvaihtomääriin, käyttötarpeeseen ja ilmanvaihdon ohjaukseen.

## 2.1 Ohjeistusta huoltokirjaan ja asukkaille

Siirryttäessä matalaenergiarakentamiseen ei rakennusten todellinen energiankulutus välttämättä laske oleellisesti keskimääräisestä nykytasosta edellä esitetystä syystä. Tästä saattaa olla seurauksena huomattava määrä reklamointeja asunnonostajien taholta, jotka matalaenergiamarkkinoinnin seurauksena ovat pettyneitä, kun energiaa kuluukin oletettua enemmän.

Tässä kohdassa on oleellista ohjeistaa asukkaita ”nuukaan” asumiseen eli korostaa asumistottumusten vaikutusta rakennusten todelliseen energiankulutukseen, jossa mm. lämpimän veden käyttö on keskeisessä osassa.

Sisäilman laadun takaamiseksi rakennusten ilmanvaihtoa ei tule ottaa missään vaiheessa kokonaan pois päältä, vaikka sen kautta kulkeutuu huomattava määrä energiaa ulos, mutta sen määrää voidaan pienentää. Ilmanvaihdon oikea sekä tarpeenmukainen säätö ja mitoitus ovat asumisviihtyvyyden sekä energiankulutuksen kannalta oleellisia.

## 3. Rakennetyypit ja rakennusosat

Siirryttäessä nykymääräysten mukaisesta rakentamisesta matalaenergiatasoon lämmöneristeiden paksuus kasvaa seinissä noin 260-280 mm:iin ja yläpohjissa noin 450-500 mm:iin, kun asiaa tarkastellaan samantyyppisillä mineraalivillaeristeillä, joita nykyisinkin käytetään. Tämä tarkoittaa seinissä eristepaksuuden lähes kaksinkertaistamista nykyisestä määrästä.

Näin merkittäväillä eristepaksuuksien kasvamisilla tulee olemaan suuri vaikutus siihen, miten rakenteet käytännössä toteutetaan. Harvoissa rakennetyypeissä eristyspaksuutta voidaan kasvattaa näin merkittävästi ilman, että rakennetyyppiin on tehtävä oleellisia muutoksia joko jo suunnitteluratkaisun tasolla tai valmistus- ja asennustekniikoiden suhteen etenkin, jos rakennusosien kustannustehokkuus halutaan pitää hyvänä. Rakenteiden energiatehokkuuden parantaminen tarkoittaa valtaosassa rakenteita muutoksia:

- käytettäviin runkopaksuuksiin
- eristetyyppeihin
- rakenteiden ja rakennusosien liitoksiin kiinnityksiin ja ripustuksiin.

Seuraavassa tarkastellaan keskeisimpien asuinkerrostalon ja rivitalojen rakenteita.

### 3.1 Alapohjat ja sokkelit

#### 3.1.1 Ryömintätilaiset alapohjat

Ryömintätilaisessa alapohjassa on jo nykyisillä eristepaksuuksilla homeenkasvulle suotuisat olosuhteet [2]. Eristepaksuuksien kasvattaminen pidentää homeenkasvulle suotuisen ajanjakson pituutta, joten tulevissa rakenteissa hometta on todennäköisesti vielä nykyistä enemmän. Ryömintätilaisissa alapohjissa tulee välttää orgaanisia materiaaleja, eli lähinnä puuta ja puupohjaisia tuulensuojalevyjä. Lämmöneristeenä on mineraalivillan sijaan suositeltavampaa käyttää solumuovieristeitä.

Myös alapuolelta lämmöneristetyssä betonirakenteisessa ryömintätilaisessa alapohjassa olosuhteet ovat homeenkasvulle suotuisia, mutta rakenteesta on helppo saada turvallinen ja toimiva, kun

- lämmöneristeenä käytetään solumuovieristeitä
- eristeiden väliset saumat tiivistetään huolellisesti saumavaahdolla (sauman leveys 15-20 mm)
- läpiviennit tiivistetään huolellisesti esim. saumavaahdolla
- alapohjan tuuletus on riittävä
- myös maapohjan pinta eristetään joko kevytsoralla tai solumuovipohjaisella eristeellä.

Oleellista on, että alapohjaan ei jää epätiiviskohtia, joiden kautta pääsisi korvausilmaa sisätiloihin. Tällaisissa alapohjissa lämmöneristekerroksen paksuutta voidaan kasvattaa varsin turvallisesti.

Kantavan alapohjalaatan päälle asennettujen lämmöneristyslevyjen päälle valetun ns. kelluvan betonilattian alle eristetilaan valuneen veden poistuminen rakenteen sisältä kestää useita vuosia. Tällaisia lattiarakenteita ei tule käyttää myöskään välipohjissa, sillä kosteusvaurion sattuessa vesi pääsee esteettä leviämään laajoille alueille ja kuivuminen on erittäin hidasta.

#### 3.1.2 Maanvastaiset alapohjat

Maanvastaisten betonialapohjien alle asennetaan nykyisin tyypillisesti 100-200 mm lämmöneristettä. Kosteusteknisesti lämmöneristeen lisääminen maanvastaiseen alapohjaan on hyvä asia, koska maapohja jäähtyy ja riski alapohjan läpi alhaalta ylöspäin tapahtuvan vesihöyryn diffuusion aiheuttamille kosteusongelmille alapohjassa vähenee. Toisaalta nykyisten määräysten mukainen alapohjan lämmöneristävyys on riittävä rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta ja lämmöneristykseen lisääminen ei paranna rakenteen kosteusteknistä toimintaa tässä suhteessa enää merkittävästi, koska maapohjan todellinen lämmönvastus on tutkimusten mukaan normeja suurempi [3].

Maanvastaisten alapohjien liitosten tiivistäminen on yhtä tärkeää kuin ryömintätilaisissakin alapohjissa, korvausilmaa ei saa tulla sitä kautta sisäilmaan. Lämmöneristekerrosten paksuntaminen lisää eristekerroksen painumista kuormituksen alla ja voi näin johtaa lattioiden painumiseen. Paksujen eristekerrosten painuminen ei tapahdu hetkessä, vaan vasta vuosien kuluessa, jolloin ongelmat ilmaantuvat viiveellä. Eristeiden painumisesta voi seurata vedeneristysten ja radontitiivistysten pettäminen sekä mahdolliset mekaaniset vauriot eristekerroksessa kulkevissa putkistoissa. Lujempien eristelaatujen käyttöönotto (kimmoisen puristumisen vähentämiseksi) saattaa jopa lisätä tätä ongelmaa, koska levyt ovat silloin

taivutusjäykempiä. Tällöin eristekerrosten väliin jää rakennusvaiheessa helposti enemmän tyhjätiloja.

### 3.1.3 Sokkelit

Rakennuksen reuna-alueella lämpövuoto alapohjasta riippuu suurelta osin perusmuurin lämmöneristävyydestä, joten perusmuurin lämmöneristykseen lisääminen on kokonaisuuden kannalta hyvinkin perusteltua. Monissa tapauksissa asuinkerrostaloissa sokkelin lämmöneristys on helppoa toteuttaa nykytyyliin betonisandwich-elementillä.

## 3.2 Kellarit

Lämmöneristysten muutokset vaikuttavat käytännössä vain kellareiden maanpäälliseen sokkeliosaan ja sen kannatuksiin. Kellarin seinistä tuettavat sokkelipalkit, jotka kantavat yläpuolisia rakenteita, kuten kuorimuuria, kannatetaan yleisesti teräsosilla kellarin betoniseinistä. Eristepaksuuden kasvaessa teräsosat pitenevät vastaavasti ja poikkileikkaukset hieman kasvavat, joka vaikuttaa mm. lisääntyvänä kylmäsiirtovaikutuksena.

Oleellisempi vaikutus saattaa tulla sokkelipalkin kiinnikkeiden rasituksista runkoon (suurempi momenttivarsi), joka on otettava suunnittelussa muuttuneena asiana huomioon.

## 3.3 Ulkoseinät

U-arvovaatimusten kiristäminen perinteiseen tapaan rakennusosatasolla on ongelmallista, koska järkevät toteutusmahdollisuudet ja toisaalta ongelmat ovat selkeästi rakennetyyppi- ja materiaalikohtaisia. Osassa rakennetyypeistä lämmöneristyspaksuuden lisääminen aiheuttaa merkittäviä teknisiä ongelmia ja muutostarpeita. Osassa rakennetyypeistä muutos voi taas sujua lähes ongelmitta. Keskeiset rakennetyypit on koottu tätä silmälläpitäen seuraavaan taulukkoon.

*Taulukko 1. Eristyskyvyn lisäämisen ongelmallisuus eri rakennusosissa [4].*

Eristyskyvyn lisäämisen ongelmallisuus		
Onnistuu helpohkosti	Joitakin vaikeuksia	Enemmän vaikeuksia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kuorimuuriseinät</li> <li>• Eristerapatut seinät, etenkin ohuteristerappaukset</li> <li>• Peltisandwichit ja peltirankaelementit</li> <li>• Kevytsovakatot (myös EPS + kevytsora)</li> <li>• Puuristikkokatot</li> <li>• Ontelolaatta-alapohjat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betonisandwich-seinät</li> <li>• Puurankaseinät</li> <li>• Mineraalivilla- ja EPS-eristetyt umpikatot</li> <li>• Puukorotetut katot</li> <li>• Kevytbetonikatot</li> <li>• Maanvastaiset alapohjat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kevytbetoniseinät ja -alapohjat</li> <li>• Hirsiseinät</li> <li>• Harkkoseinät</li> <li>• Puurakenteiset vasakatot</li> <li>• Puurakenteiset ryömintätilaiset alapohjat</li> </ul>

Teollisessa asuinrakentamisessa käytettävissä seinärakenteissa eristyspaksuuden kasvattaminen onnistuu joko helpohkosti tai siinä kohdataan jonkinasteisia vaikeuksia. Yhteistä kaikille seinärakenteille on, että seinän uloin osa altistuu jatkossa ankarammalle kosteus- ja pakkasrasitukselle, koska ulko-osat ovat aiempaa kylmemmässä ja niiden kuivuminen on hitaampaa. Tämä asettaa korkeampia pakkasenkestävyysvaatimuksia sekä edellyttää hyvää laadunhallintaa käytettäville tuotteille, mutta erityisesti betoneille ja laasteille.

### 3.3.1 Betonisandwich-seinät

Sandwich-elementtien valmistaminen edellyttää muottikaluston uusimista seinien paksuuntuessa. Ns. käännettyjen kulmien tekeminen, joka on tähänkin saakka ollut hankalaa erityisesti pesubetonijulkisivuissa, hankaloituu edelleen ulokkeen pidentyessä. Toisena vaihtoehtona on, että nurkkadetalji muutetaan sellaiseksi, että kahden vierekkäisen elementin ulkokuoren reunat ovat ulokkeena. Ulokkeellisten elementtien määrä ja siten vaurioitumisriski asentaessa kasvaa. Ulkokuoren ulokkeiden pituuksien kasvaessa myös niiden kaareutumistaipumus lisääntyy, sillä ulkokuoren reunimmat kiinnityspisteet siirtyvät kauemmas reunasta.

Nykymuotoiset ansaat eivät enää toimi matalissa nauhaelementeissä eikä matala- ja passiivienegeriarakenteissa [5]. Ulkokuoren kannatuksessa siirryttäen erilaisiin muototeräskannakkeisiin tms., joista saattaa tulla nykyistä suurempia kylmäsiirtavaikutuksia ja paikallisia jännityshuippuja. Myös elementtien nostolenkkien paikat joudutaan suunnittelemaan uudelleen elementtien painopisteen muuttumisen vuoksi.

### 3.3.2 Eristerapatut elementit

Eristerapattujen elementtien kuljetukseen ja asentamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota vaurioitumisen välttämiseksi. Näissä rakenteissa jouduttaneen suurempaan kerrosten välisiin työmaalla asennettaviin lämmöneristys- ja rappauskaisoihin, koska elementtien reunoille on jätettävä käsittelyvaraa.

Käytettävien lämmöneristeiden pitkäaikaisen leikkausjäykkyyden tulee olla riittävän suuri, jotta rappaukset eivät painu liikaa.

### 3.3.3 Puuseinät

Puurakenteisissa ulkoseinissä nykymuotoinen pystyrungon toteutustapa muuttunee joko levyuuma- tai ristikkoratkaisuksi, jolloin sisäpuolinen lisäkoolaus ja sen mukanaan tuomat lämpö- ja kosteus-tekniiset edut menetetään.

Yksitolpparungon tilalle voi tulla myös eriytetty kaksitolpparunko. Tämän seurauksena saattaa tulla ongelmia rakennusten jäykistyksen järjestämisessä.

Paksujen puuelementtien liitosten toiminnan hallitseminen vaikeutuu. Nyt esim. suuri osa kiinnityksistä tehdään vain toispuoleisina.

## 3.4 Yläpohjat

### 3.4.1 Umpikatot

Kerrostalojen yläpohjissa on yleisesti käytössä kevytsoraeristettyjä rakenteita sekä mineraalivillaeristeisiä bitumikermikattoja. Näissä rakenteissa tuuletus on järjestetty painovoimaisena räystäältä sekä lisäksi mahdollisesti ns. alipainetuulettimin katon keskiosilta. Kattorakenteen tuuletus on niin vaatimatonta ja satunnaista, että näitä voidaan pitää ns. umpirakenteina. Näiden huonosti tuulettuvien rakenteiden tuulettamista on yleisesti lisättävä ja tarvittaessa toteutettava koneellisesti.

Huonosti tuulettuvien kattojen läpivientien ja liitosten huolellinen tiivistäminen on tärkeää, jotta sisäilman kosteus ei kulkeudu katon sisään eikä toisaalta korvausilmaa ei imetä yläpohjan kautta sisäilmaan. Rakenteissa on käytettävä höyrynsulkuna kumibitumikermejä myös ontelolaattojen saumojen kohdilla.

Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja sadevedeltä suojaaminen ovat ensimmäinen edellytys rakenteen onnistuneelle toteutukselle, sillä rakenteeseen päässyt vesi ei kevytsoraeristetyistä katosta poistu käytännössä koskaan.

### 3.4.2 Tuulettuvat katot

Lämmöneristyksen lisääminen nykyisestä tasosta muuttaa kattorakenteen olosuhteita hieman homeen kasvulle suotuisammaksi.

Kantavan betonilaatan päältä tuettujen yläpohjien läpivientien ja liitosten huolellinen tiivistäminen on erityisen tärkeää, jotta sisäilman kosteus ei kulkeudu yläpohjaonteloon ja toisaalta korvausilmaa ei imetä yläpohjan kautta sisäilmaan.

Puurakenteisissa vasakatoissa tiiviys on aivan yhtä tärkeää kuin muissakin katoissa. Mikäli palkkirakenteista siirrytään mataliin NR-ristikoihin, ala- ja yläpaarteiden erilaisesta kosteustilasta johtuen rakenteen kosteusmuodonmuutokset tulevat lisääntymään merkittävästi, mikä on otettava huomioon liitosten suunnittelussa ja tiivistämisessä.

## 3.5 Sisäänvedot ja kattoterassit

Rakennuksen vaipan erilaiset sisäänvedot ja kattoterassit on eristettävä periaatteessa yhtä hyvin kuin muutkin rakennusosat. Tosin kompensatioperiaate on käytössä tulevaisuudessakin. Erilaisten erkkereiden ja sisäänvetojen kohdilla huonekorkeudet saattavat jäädä mataliksi. Ja kattoterassien kohdalla taas nousut sisältä voivat olla melko korkeita.

Lähtökohtaisesti erilaiset rakennuksen kulmat ja tasoerot aiheuttavat huomattavan haitan rakentamisen kaikissa vaiheissa suunnittelusta huoltotoimiin, joten niihin on todella paneuduttava niin suunnittelussa kuin toteutuksessakin.

## 3.6 Ikkunat ja ovet

Ikkunat ja ovet ovat huomattavasti huonommin lämmöneristettyjä rakennusosia kuin seinät ja yläpohjat. Lähtökohtaisesti ikkunat ja ovet tulisi asentaa lämmöneristeen kohdalle. Lämmöneristeiden paksuuntuessa ikkunoiden ja ovien sijoittaminen nykyisiin paikkoihinsa aiheuttaa aukon pieleen kylmän kohdan esim. betonsandwich-seinässä.

Mikäli ikkuna asennetaan myös ruutuelementtiin samoin kuin kantaviin elementteihin nykyisin, joudutaan sisävalmistusvaiheessa tekemään huomattavan paljon ns. smyygejä, joiden tekeminen on hidasta ja kallista.

Ikkunoiden ja ovien kiinnittämiseen sekä mahdollisesti myös karmipaksuuksiin tarvitaan selvästi kehitystyötä, jotta päästään kokonaisuuden kannalta optimaaliseen ratkaisuun. Eräs ratkaisu voisi olla järjestelmä, jossa ulommainen ikkuna olisi myös lämpölaselementti julkisivun ulkopinnan läheisyydessä ja toinen ikkuna asennettaisiin lähelle sisäpintaa. Tällöin seinärakennetta kapeammasta ikkunasta johtuva seinän lämmöneristyksen heikennys pienenesi oleellisesti.

### 3.7 Rakenteiden kastuminen ja työnaikainen suojaus

Tyypillisimmin rakenteille hitaasti ja vaikeasti poistuvaa ylimääräistä kosteusrasitusta aiheuttavat:

- runkovaiheessa tasoilta ulkoseinäelementtien eristetilaan valuva vesi
- yläpohjan rakentaminen, erityisesti ns. umpikatot
- ns. kelluvien lattioiden valaminen kantavan laatastons päälle asennettujen eristeiden päälle
- ennakoimattomat paikalliset kosteuslähteet, kuten vesiletkujen vuodot, laastisekoitus työpisteessä jne.

Muut märät työvaiheet, kuten tasoitustyöt ja pintalattioiden valaminen märkätiloihin ja muualle suoraan kantavaan laattaan kiinni, aiheuttavat rakennusvaiheessa ylimääräistä kosteusrasitusta, joka kuitenkin on mahdollista kuivattaa suhteellisen nopeasti em. rakenteiden suuren haihduttavan pinta-alan johdosta.

Rakenteiden työnaikainen kastuminen tulee estää hyvin suunnitellulla ja toteutetulla työnaikaisella suojauksella. Erityisen tärkeää on estää veden pääsy kerroksellisten ja kotelomaisten rakenteiden sisään, joista kosteuden poistuminen on hyvin hidasta. Tällaisia ovat mm. jo mainittujen betonisten sandwich-elementtien yläosien lisäksi ikkuna- ja läpivientiaukkojen kohdat, puuelementit yleisesti sekä jo kertaalleen kuivuneet betoni- ja muut rakenteet.

Rakennuskosteuden hitaalla poistumisella on betonirakenteiden kuivumiskutistuman ja käyrystymistäipumuksen suhteen myös positiivisia vaikutuksia. Hitaan kuivumisen johdosta betonin lujuus ehtii kehittyä paremmin, jolloin pintojen halkeilu jakautuu tasaisemmin ja halkeamaleveydet jäävät pieniksi. Toisaalta betonin tasoitus- ja pinnoitustöiden aloitus siirtyy myöhäisemmäksi. Hitaan kuivumisen vuoksi paksuissa betonivaluissa materiaalille ominainen ns. autogeeninen kuivumiskutistuma, johon voidaan vaikuttaa vain materiaalivalinnoilla, ei jälkihoidolla, tapahtuu entistä myöhemmin. Tästä saattaa olla seurauksena mm. lattia- ja seinälaattojen irtoamista mikäli laatoituksen alla ei käytetä ns. laakerointikerrosta.

## 4. Muovipohjaiset lämmöneristeet

Rakenteiden paksunemisen rajoittamiseksi teollisuus ja suunnittelijat ottanevat käyttöön nykyistä alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavia tuotteita nykyistä laajemmassa mittakaavassa ja uusissa käyttökohteissa. Nämä tuotteet ovat suurelta osin solumuovipohjaisia, joten niiden ominaisuudet poikkeavat monilta osin merkittävästi totutuista mineraalivillaeristeistä:

- Eristeet ovat merkittävästi tiiviimpiä kuin mineraalivillat, joka on otettava huomioon mm. rakennekerrosten tiiviyssuhteissa, tuuletustarpeissa ym. kosteusteknisessä toiminnassa sekä rakenteiden pidempinä kuivumisaikoina
- Solumuovipohjaisilla lämmöneristeillä esiintyy jälkikutistumaa, eristeiden lämpöliikkeet aiheuttavat pakkovoimia ja rungon liikkeet pakkovoimia eristeisiin. Näistä kaikista voi aiheutua rakoja eristeisiin sekä eristeiden ja rungon välisiin liitoksiin.
- Solumuovipohjaisten eristeiden äänen absorptiokyky on pieni. Jäykkänä levymäisinä tuotteina ne jopa voivat vahvistaa ääniä, mikäli ne pääsevät värähtelemään ominaistaajuudella.
- Solumuovipohjaisten tuotteiden palokäyttäytyminen ja –kuormat on otettava huomioon.

Em. seikkojen johdosta solumuovipohjaisten tuotteiden käyttöönotto uusissa käyttökohteissa edellyttää erityistä ammattitaitoa, jotta rakenteista tulee kaikissa suhteissa toimivia. Esimerkiksi tehokkaamman eristyskyvyn omaavien jäykkien lämmöneristeiden asennustekniikat poikkeavat merkittävästi kokoonpuristuvilla villaeristeillä soveltuvista tekniikoista. Tämän johdosta lämmöneristeiden asennusvirheet saattavat yleistyä merkittävästi, mikä taas saattaa aiheuttaa mm. kosteusvaurioita ja energiatehokkuuden jäämisen merkittävästi laskennallista heikommaksi.

On esimerkkejä, joissa sinänsä hyvin ilmatiiviiden solumuovilämmöneristeiden käyttö on aiheuttanut rakennuksen ilmanpitävyyden romahtamisen rakennuksen käyttöönoton ja rakennuskosteuden poistumisen jälkeen, kun rungon liikkeet ovat aiheuttaneet eristeen liitosten auki repeämisen.

Edellä mainituista seikoista huolimatta solumuovieristeillä on myös selkeitä etuja:

- ne sietävät hyvin kosteutta ja alkalisuutta
- niillä on mahdollista saavuttaa hyvin ilma- ja vesihöyrytiiviitä rakenteita ja liitoksia
- alhaisemman lämmönläpäisyn ansiosta rakennepaksuudet ovat ohuempia kuin mineraalivilloilla
- tarvittaessa saadaan hyvin kuormitusta kestäviä eristeitä.

## 5. Sisäilmaston laatu

Ulkoseinien lämmöneristyskykyä ja tiiviyyttä parannettaessa tulee valmistautua siihen, että sisäilmaston laatu tietyltä osin saattaa laskea. Tämä koskee toisaalta ilmanvaihtoa ja toisaalta lämpöviihtyvyyttä lämmityskauden ulkopuolella.

Rakennusvaipan lämmöneristävyyden parantaminen edistää hyvän sisäilmaston saavuttamista lämmityskauden aikana. Kun hyvin lämmöneristetyssä rakennuksessa ulkovaipan tulee ehdottomasti olla hyvin ilmanpitävä, vuotoilmanvaihtoa ei tapahdu käytännössä juuri ollenkaan. Tästä seuraa, että rakennusten ilmanvaihtolaitteistoja on käytettävä kaikissa olosuhteissa riittävällä teholla ja varmistettava laitteiden toimivuus nykyistä huolellisemmin. Muussa tapauksessa rakennusten sisäilman laatu heikkenee merkittävästi ja kosteusvaurioriski kasvaa. Ilmanvaihdon merkitystä ja oikeaa käyttöä tulee opastaa ja ohjeistaa asukkaille ja rakennuksen huoltohenkilöstölle. Rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen kannalta LTO-laitteistojen hyötysuhteen parantaminen on avainasemassa.

Lämmityskauden ulkopuolella lämpökuormat ja auringon säteily kohottavat sisätilojen lämpötilaa huomattavasti enemmän nykyääräyksien mukaan eristettyihin rakennuksiin verrattuna. Erityisesti näin tapahtuu suuren lämpökuorman omaavissa toimistorakennuksissa ja kevytrakenteisissa rakennuksissa, joissa rakenteiden kyky tasata lämpötilan vuorokausivaihteluita on pieni. Eräiden selvitysten mukaan ylimmät sisälämpötilat saattavat näissä tapauksissa kohota nykyisestä useilla asteilla, jopa yli 5 asteella. Tästä syystä rakennusten jäähdytystarve kasvaa huomattavasti, mikä toisaalta laukaisee päätöksen ylipäättään ottaa käyttöön jäähdytys sekä kasvattaa rakennusten sähkönkulutusta.

### 5.1 Ilmatiiviys

Hyvin lämmöneristetyissä rakennuksissa pienetkin ilmavuodot aiheuttavat herkästi vedontunnetta, joten myös rakennusten ilmatiiviiden tulee olla hyvä. Rakennuksen ilmatiiviysluvun tulee olla  $< 1$ . Tämä arvo on helposti saavutettavissa huolellisella rakenteiden ja liitosten valinnalla ja suunnittelulla sekä huolellisella liitosten ja läpivientien toteutuksella.



Erilaisia rakenteiden ja liitosten tiivistyksiä tarvitaan todennäköisesti jonkin verran nykyistä enemmän, joten asioiden opetteluun menee kaikilla rakentamisen osapuolilla jonkin verran aikaa. Tärkeintä on ensin oppia rakenteiden oikea toiminta.

## 6. Suunnittelunohjaukset

Siirtyminen matalaenergiarakentamiseen on käynnissä koko rakentamisen kentässä kovalla vauhdilla, sillä konseptien pitää olla selvillä viimeistään 1.1.2010. Kireä aikataulu sekä kaikkien asioiden muuttaminen samanaikaisesti asettaa suunnittelijat sekä suunnittelunohjauksen suurten haasteiden eteen.

Perinteisesti rakenteiden suunnittelu on tehty lujuusmitoituksena ja kaikki muut asiat on sitten ratkaistu ”kuten ennenkin”, eli kokemusperäisesti on tiedetty palo-, ääni-, lämmöneristys jne. asioiden täyttyvän, kun rakenteet ja rakennusosat on valittu ”perinteisiksi”. Nyt, kun rakenteiden dimensiot muuttuvat, otetaan käyttöön uusia tuotantotekniikoita sekä muutetaan satoja muita asioita yhtä aikaa, vaaditaan rakennesuunnittelijoilta hyvää suunnitteluosaamista myös ääni-, palo- ja lämpötekniikassa perinteisen lujuusmitoituksen lisäksi.

Suunnittelunohjauksessa tulee varmistaa, että suunnittelijoilla on osaamisen lisäksi myös riittävästi aikaa tehdä suunnitelmia kuntoon. Jo kaikkien liitosten mittojen muuttaminen yhteensopivaksi kokonaisuudeksi on suuri työ. Puhumattakaan, kun siihen vielä lisätään ilma- ja äänitiiviyys sekä lämmöneristävyys ym. asiat. Luonnollisesti oppimisen kautta myös suunnittelu helpottuu näiltäkin osin ajan kuluessa.

Myös rakennusosien ja tuotteiden valmistajat tekevät omia suunnitteluohjeitaan samanaikaisesti, kun kohteita jo suunnitellaan. Suunnittelunohjauksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota kokonaisuuden hallintaan, jotta kaikki suunnitelmat ovat ristiriidattomia ja myös rakennusosien valmistajat pystyvät ne tekemään.

### 6.1 Aikataulut vs. rakenteiden kuivuminen

Kuten on jo todettu rakennusaikaisen kosteuden poistuminen rakenteista on hidasta ja se tulee lämmöneristeiden paksuuntuessa vielä hidastumaan. Lisäksi mineraalivillojen korvaaminen solumuovieristeillä muuttaa kuivumiskäyttäytymistä siten, että rakenteet kuivuvat enemmän vain yhteen suuntaan eli sisätiloihin päin.

Rakenteiden kuivumiselle tulee antaa riittävästi aika. Rakenteita tulee pyrkiä tekemään mahdollisimman ”kuivina”, jotta kuivatustarve olisi mahdollisimman pieni. Tämä edellyttää mm. hyviä suojauksia. Rakenteita voidaan myös kuivata aktiivisesti, joka tosin lisää rakennustyön energiankulutusta sekä rakennuskustannuksia.

Mm. näiden seikkojen huomioon ottaminen lisää jonkin verran rakentamisen kokonaisaika ja kustannuksia, jotka tosin on mahdollista saada ainakin osittain takaisin vähentyneenä takuukorjaustarpeena.

## 7. Yhteenveto

Vaipparakenteiden lämmöneristyskyvyn lisääminen muuttaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa yleisesti ottaen epäedulliseen suuntaan. Tämä johtuu siitä, että rakenteiden kuivumiskyky ja siten ns. vikasietoisuus heikkenevät, koska rakenteiden läpi johtuva kuivattava lämpövirta pienenee suorassa suhteessa U-arvojen alenemisen kanssa ja kosteuden poistuminen hidastuu. Tällä on merkitystä sekä rakentamis- että käyttövaiheissa.

1. Rakentamisen yhteydessä tulee varata nykyistä enemmän aikaa rakennuskosteuden poistumiseen vaipparakenteista.
2. Yhä suurempi osa vaipparakenteiden rakennuskosteudesta myös poistuu rakennuksen sisätilojen suuntaan, millä on vaikutusta sisätöissä mm. kuivatusjärjestelyihin ja töiden aikatauluihin.
3. Rakennusten käyttövaiheessa kuivumiskyvyn heikkeneminen alentaa rakenteiden vikasietoisuutta. Rakenteiden kuivumispotentiaalın vähentyminen aiheuttaa sen, että erityyppiset nykyisin normaalina pidetyt toimivuuspuutteet alkavat yhä helpommin muodostaa haittaa aiheuttavia vaurioita. Esimerkiksi vähäiset sisäilman vuodot vaipparakenteiden läpi tai pienet vesivuodot (vesikatevuodot, julkisivusaumojen vuodot, putkistokondenssi yms.) rakenteisiin saattavat alhaisen lämmönläpäisevyyden omaavissa rakenteissa johtaakin vaurioiden syntymiseen, koska kuivuminen tapahtuu aiempaa hitaammin.
4. Rakennusten oikeaan ja optimaaliseen käyttöön tarvitaan selkeää ohjeistusta ja käyttöopastusta sekä asukkaille että kiinteistön ylläpidosta vastaaville henkilöille.

Yleisesti ottaen rakenteiden kuivumiskyvyn heikkeneminen lisää riskiä lähinnä sille, että rakenteisiin muodostuu haitallisia homekasvustoja. Tämä saattaa olla tulevaisuudessa ongelmakenttänä vielä nykyistäkin merkittävämpi, koska rakennusten käyttäjien vaatimukset homevaurioiden suhteen todennäköisesti tiukentuvat edelleen. Ongelmaa kasvattaa myös se, että ilmastonmuutoksen seurauksena sääolot Suomessa muuttunevat selvästi homeen kasvua suosivaan suuntaan.

## Lähdeluettelo

- [1] Vinha J., Korpi M, Kalamees T., Eskola L., Palonen J, Kurnitski J., Valovirta I., Mikkilä A., Jokisalo J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampere, TTY Talonrakennustekniikka tutkimusraportti 131. 102 s. + 10 liites..
- [2] Padt, M., Tolstoy, N. & Deling J. 2004. Fukttekniska lösningar för krypgrunden med problem. Bygg & teknik 8/04, ss. 29-34.
- [3] Leivo, V. & Rantala, J. 2003. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 120. 106 s + 13 liites.
- [4] Mattila J., Lahdensivu J., Suonketo J. 2008 Rakennetyyppien ja tuotantotekniikoiden muuttuminen in Vinha J. Lindberg R Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tampere, TTY Talonrakennustekniikka Tutkimusselostus 1706/2008. 89 s.
- [5] Rantala J. 2009. Matalaenergia betonisandwich-elementtien kantavuuslaskelmat. Tampere, TTY Talonrakennustekniikka. 105 s.

# Kosteusteknisesti turvallinen matalaenergia- ja passiivirakentaminen

Pasi Käkälä ja Janne Jormalainen  
SPU Systems Oy

## Tiivistelmä

Energiatehokkuusvaatimusten ja sitä kautta lämmöneristyksen ja rakenteiden paksuuden kasvaminen on herättänyt keskustelua rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta. Selvää on, että rakenteiden tulee toimia aina myös kosteusteknisesti moitteetta. SPU Systems Oy on teettänyt VTT:llä useille erilaisille polyuretaanieristeisille rakenneosille kosteusteknisestä toimivuudesta mallinnuksen. Rakenneosina on ollut matalaenergia- ja passiivitaso-ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteita. Tässä artikkelissa on käsitelty yleistasolla muutamia näistä. Lisäksi on käsitelty muutamia kosteustekniseen toimintaan oleellisesti vaikuttavia polyuretaanieristeen ominaisuuksia.

Mallinnuksen tuloksista voidaan yleisenä johtopäätöksenä vetää se, ettei tutkituissa rakenteissa tavanomaista parempi lämmönläpäisykerroin sinällään aiheuta kosteusteknisen riskin kasvamista. Tulokset koskevat luonnollisesti normaaleja sisäilman olosuhteita Suomen ilmastossa. Mahdolliset riskit liittyvät itse rakentamisen ja detaljien suunnittelun huolellisuuteen eli rakentamisen laatuun. Vastaavat riskit ovat kuitenkin aina olemassa, vaikka rakenteiden lämmöneristysominaisuudet olisivat tasoltaan huonommat.

SPU-polyuretaanieristeen perusominaisuuksia ovat pieni lämmönjohtavuus, suuri vesihöyrynvastus sekä alhainen tasapainokosteus ja veden imeytymä. Yhteenvetona voidaan todeta, että SPU-eristeiden kosteustekniset ominaisuudet ja eristeiden käyttötavat ja -menetelmät ovat sellaisia, että niillä on verrattain helppo toteuttaa hyvin lämpöä eristäviä, tiiviitä ja kosteusteknisesti turvallisia rakenteita.

## 1. Johdanto

Energiamääräysten kiristyessä rakenteiden kosteustekninen toimivuus asettaa entistä suurempia haasteita suunnittelulle. Tämä seikka on ollut julkisuudessaakin viime aikoina paljon pinnalla. Aihe on tärkeä eikä sitä saa kevyesti sivuuttaa energiamääräysten kiristämisen varjolla. Koska rakennusten energiatehokkuuden parantaminen kohti passiivitasoa on kuitenkin väijäämätön suunta tulevaisuudessa, pitää tämän ohella suunnittelussa yhä enenevässä määrin huomioida myös rakenteiden kosteustekninen toimivuus.

SPU Systems Oy:ssä on teetetty useille erilaisille polyuretaanieristeisille rakenteille laskennallinen mallinnus kosteusteknisestä käyttäytymisestä. Tässä esityksessä käsitellään 6 erilaisen passiivenergiatason rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä Suomen ilmasto-olosuhteissa. Rakenteiden mallinnus on tehty käyttäen Wufi 4.2 Pro-ohjelmaa. Varsinainen mallinnus on tehty VTT:llä. Mallinnuksen avulla voidaan päätellä, etteivät tutkitut polyuretaanieristeiset, tavanomaista huomattavasti paremmin eristävät rakenteet, sisällä suurempaa kosteusteknistä riskiä kuin huonommin eristävät rakenteetkaan. Rakenneosina käsitellään matalaenergia- ja passiivitaso-seinä-, alapohja- ja yläpohjarakenteita, joiden U-arvot

ovat pääsääntöisesti alle  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Lisäksi käsitellään lyhyesti polyuretaanieristeen ja siitä tehtyjen rakenteiden käyttäytymistä ja ominaisuuksia.

## 2. SPU eristeiden kosteusteknisiä ominaisuuksia

SPU-eristeet valmistetaan laminaattoritekniikalla. Pääraaka-aineina ovat polyoli, MDI ja punneaine. Punneaineena käytetään ympäristölle haitatonta hiilivetyä, pentaania. Eristelevyjen pintalaminaatteina käytetään diffuusiotiiviitä laminaatteja joko paperi- tai alumiinipintaisia. Eristelevyjä on mahdollista saada myös pinnoittamattomina tai erilaisilla pintaverhouslevyillä varustettuna. Pääraaka-aineita, laminaatteja tai pintaverhouslevyjä muuttamalla voidaan vaikuttaa valmiin tuotteen mm. rakennusfysikaalisiin, palo- tai ääneneristysominaisuuksiin. PUR eristeen huokosrakenne on suljettu.

### 2.1 Lämmönjohtavuus

SPU-eristeiden lämmönjohtavuus määritetään standardin EN 13165 mukaan [1]. PUR tuotteiden pieni lämmönjohtavuus perustuu punneaineen (pentaani) ilmaa paljon pienempään lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuuden määrittämisessä otetaan huomioon eristeen vanheneminen ts. punneaineen diffuuntoituminen eristeen huokosista. Tuotestandardin [1] menetelmä antaa suunnittelulämmönjohtavuudelle ( $\lambda_{\text{desing}}$ ) arvion, jonka tuote täyttää yli 25 vuoden kuluttua valmistuksesta. Laboratoriossa mitatut  $\lambda_{10}$  arvot ovat noin  $0,004 \text{ W/mK}$  pienempiä, joten uuden eristeen lämmönjohtavuus on siis selvästi pienempi kuin suunnitteluarvo. Koska PUR eriste on umpisoluinen ja lähes täysin ei-hygrooskooppinen, suunnitteluarvoon ei sisälly kosteuskorjauksia.

SPU-eristeille CE-merkinnässä ilmoitetut ( $\lambda_{\text{desing}}$ ) arvot:

- $0,024 \text{ W/mK}$  diffuusiotiiviitä laminaatteja käytettäessä
- $0,026 \text{ W/mK}$  ilman laminaatteja tai ei-diffuusiotiiviillä laminaatilla
- $0,027 \text{ W/mK}$  tietyt ohuet erikoistuotteet

### 2.2 Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyryn läpäisevyyden arvoksi polyuretaanille ilmoitetaan kirjallisuudessa yleisesti  $0,1 - 1,2 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ .

Eristelevyjen vesihöyrynläpäisevyys riippuu siitä, onko eristelevy pinnoitettu vai ei ja luonnollisesti pinnoitetta käytettäessä sen ominaisuuksista. 30 mm paksulle SPU-eristeelle ilmoitetaan seuraavat vesihöyrynvastusarvot:

- pinnoittamaton (SPU 30)  $54 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$
- paperilaminaattipintainen (SPU P30)  $94 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$
- alumiinilaminaattipintainen (SPU AL30)  $4050 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$

Vertailuna voidaan todeta, että  $0,2 \text{ mm}$  PE kalvon vesihöyryn vastusarvo on luokkaa  $500 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$  ja bitumipaperilla riippuen paperin paksuudesta ja bitumista luokkaa  $0,5 - 5 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ . Alumiinilaminaattipintaisten eristelevyjen vesihöyrynvastus on siis lähes 8-kertainen verrattuna höyrynsulkuna yleisesti käytettyyn muovikalvoon ja pinnoittamattomanakin moninkertainen verrattuna bitumipaperiin. Näin ollen jo hyvin ohuellakin polyuretaanieristeellä rakenteen sisäpinnassa saadaan aikaan riittävä höyrynsulku.

### 2.3 Veden imeytyminen

Polyuretaani kestää pinnoittamattakin hyvin kosteutta. Umpisolurakenteensa ansiosta siihen imeytyy vähän vettä. Vedenimeytymä 100 %:n suhteellisessa kosteudessa on enintään 0,2 tilavuus-%, kelluntakokeessa enintään 0,5 tilavuus-% ja upotuskokeessa (110pv, upotussyvyys 60 cm) enintään 3,0 tilavuus-%. [2]

## 3. Tutkitut rakenteet

VTT on tehnyt laskennallista analyysiä kosteusteknisestä toimivuudesta muutamille SPU eristeillä toteutetuille passiivitasoisille ratkaisuille. Kaikki mallinnukset on tehty käyttäen Wufi 4.2 pro -ohjelmaa [3,4]. U-arvojen määrittäminen ei kuulunut VTT:n mallinnuksen piiriin. Lisäksi rakenteet on oletettu ilmatiiviksi eli konvektion vaikutusta ei ole huomioitu. Tuuletetut rakenteet eivät myöskään olleet alttiita viistosateelle, eikä auringon säteily tai taivaan vastasäteily vaikuttaneet rakenteeseen. [3,4].

### 3.1 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet

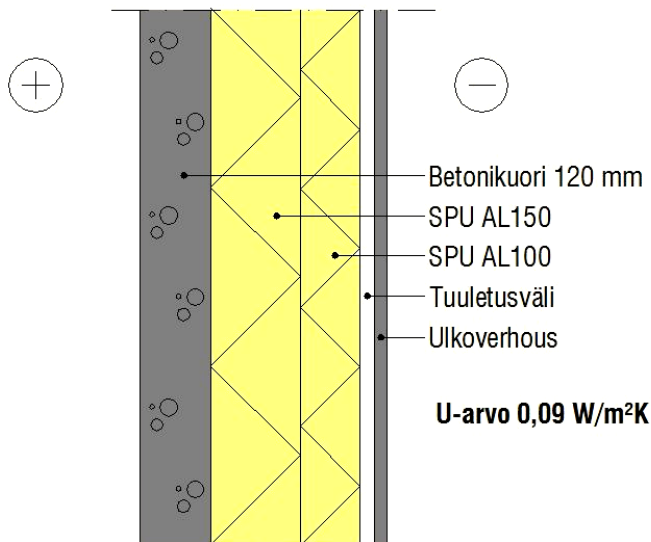
Ilmastotietoina mallinnoissa käytettiin Jyväskylän vuoden 1979 ilmastotietoja. Vuosi edustaa kylmää, lämpötekniiseen mitoitusjaksoa, joten se tuo varmuutta myös kosteustekniseen suunnitteluun. Sisäilman kosteuskuormitus valittiin standardin EN13788 kosteusluokka 3:n mukaiseksi betonikuorisessa ulkoseinässä ja muissa kosteusluokka 2:n mukaiseksi.

Kyseinen sisäilmankosteuskuormitus on varsin korkea. Kosteusluokassa 3 kosteuslisä sisäilmassa on  $+6 \text{ g/m}^3$ , kun ulkoilman lämpötila on alle  $0 \text{ °C}$  ja kosteusluokassa 2 vastaavasti  $+4 \text{ g/m}^3$ . Kosteuslisän arvo muuttuu edellä mainituista arvoista lineaarisesti kohti tasapainoa ( $0 \text{ g/m}^3$ ), kun lämpötila nousee  $0 \text{ °C}$ :sta  $+20 \text{ °C}$ :een. Lähteessä [5] on esitetty kosteusteknisen suunnittelun perustaksi  $+4 \text{ g/m}^3$  normaaleissa olosuhteissa ja  $+5 \text{ g/m}^3$ , kun kosteustuotto on normaalia suurempaa. Tältä osin voidaan tarkasteluja pitää varmallalla puolella olevina.

Rakenteiden kaikkien materiaalikerrosten alkukosteus oletettiin  $80 \text{ % RH}$  suhteellista kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen. Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet perustuivat laskentamallin tietoihin, jotka on koottu kattavasti mm. kansainvälisessä yhteistyössä tehdyissä hankkeissa. Laskennassa tarkastelujakso vaihteli tapauksittain ja oli vähintään 3 vuoden pituinen. [3,4]

### 3.2 Betonikuorinen passiiviseinä

Tutkitun rakenteen leikkauskuva on esitetty kuvassa 1. Rakenteen sisäpintaan oletettiin lisäksi kipsitasoitus ja pinnan maalaus. Tarkastelu suoritettiin kahdelle erilaiselle tapaukselle: alumiinipintaiselle SPU eristeelle (tapaus 1) ja pinnoittamattomalle (tai paperipintaiselle) SPU-eristeelle (tapaus 2). Taulukossa 1 on esitetty laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet.



Kuva 1. Betonikuorinen SPU-eristeinen passiivitasoinen ulkoseinä. Kuvassa esitetty U-arvo on laskettu rakenteelle, jossa eriste on betoninvalussa kiinni ilman mekaanisia kiinnikkeitä. Jos rakenteessa käytetään mekaanisia kiinnikkeitä, tulee niistä aiheutuva kylmäsiirtavaikutus ottaa tapauskohtaisesti huomioon.

Taulukko 1. Rakenteiden eri kerrosten dimensiot, lämmönjohtavuudet ja kerrosten vesihöyryn diffuusiovastukset [4].

Materiaalikerros	Paksuus, mm	Lämmönjohtavuus $\lambda_{design}$ , W/(K m)	Kerroksen vesihöyrynvastus $S_d$ , m
Betoni	120	1,7	30
PU-eristys	100	0,024	5
PU-eristys	150	0,024	7,5
Alumiinipinnoite	1	-	1500
Sisätasoite ja maali	5		0,1

### 3.2.1 Tulokset

Tapauksen 1 kokonaiskosteus ei enää muutu vuositasolla 30 vuoden jälkeen. Tapauksessa 2 rakenne on vuositasolla jatkuvasti kuivuva ja saavuttaa ilmeisesti jokseenkin saman kokonaiskosteuksen kuin tapaus 1, mutta nopeammin ( $m''_{tot} < 7 \text{ kg/m}^2$ ). Kuivuminen tapahtuu tapauksessa 1 sisäänpäin ja tapauksessa 2 myös eristeen läpi ulospäin. [4]

Kokonaiskosteus ei yksin riitä kuvaamaan rakenteiden toimintaa. Erityisesti alumiinipintaisten eristelevyjen pintakosteudet voivat saada suuria arvoja, mikä ei välttämättä näy kokonaiskosteuksessa. Tapauksessa 1 uloimman PU -eristeen suhteellinen kosteus saa ajoittain RH 85% ylittäviä arvoja, mutta tämä edustaa riskiä rakenteelle. Sisemmän eristekerroksen ulkopinnan kosteudet jäävät alle RH 80% tason koko aikana. Ulkopinnan alumiinikalvon kosteus vaihtelee voimakkaasti vuoden aikana ja siinä esiintyy ajoittain kondenssiolosuhteet ulkoilman tilasta johtuen. Tuuletusrakoa vastaan olevan pinnan kosteuksia on tarkasteltu arvioimalla laskennallista homeen kasvun riskiä. Kummassakin tapauksessa homeindeksi jää alle tason 1. Samoin varmistettiin vielä uloimman eristeen alumiinipinnoitteen alla olevan kerroksen olosuhteiden turvallisuus. Niissäkään ei todettu homekasvun edellytyksiä. [4]

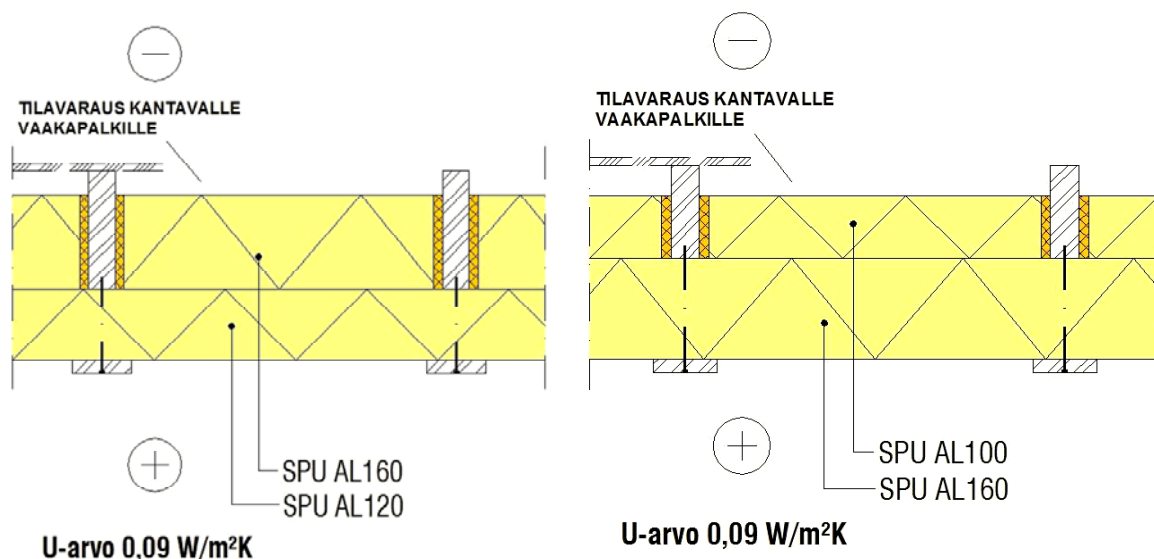
### 3.2.2 Johtopäätökset

Tulosten perusteella tarkastellut rakennetapaukset ovat kokonaiskosteuden muutoksen ja rajapintojen sekä tuuletusrakoon rajoittuvan pinnan homehtumisriskin suhteen kosteusteknisesti toimivia. Alumiinipinnoitteet eivät muodosta sellaisia kosteutta kerääviä diffuusiiovastuksia, jotka voisivat käytetyillä alkukosteuksilla ja kosteuskuormilla aiheuttaa ongelmia rakenteessa. [4]

### 3.3 Puurunkoinen seinä

Tarkasteltuja rakenteita oli kaksi, jotka poikkesivat eristedimensioiltaan (kuva 2). Vaihtelemalla eristelevyjen keskinäisiä paksuuksia, saadaan runkosyvyudeksi valittua mahdollisimman pieni dimensiainen runkotolppa. Tällöin runkotolpan koon määrittelevät ainoastaan rakenteelliset seikat, ei lämmöneristeen paksuus.

Näiden seinien tarkasteluissa sisäilman kosteuslisänä käytettiin EN13788 kosteusluokka 2:n mukaisia arvoja. Tarkastelu tehtiin molemmille rakenteille kolmen vuoden jakson ajalle. Tarkastelussa selvitettiin rakenteen kokonaiskosteuden ja uloimman runkopuun kosteuden muutoksen lisäksi puun tuuletusrakoa vastaan olevan pinnan sekä SPU eristeen ja puun rajapinnan olosuhteet.[6]



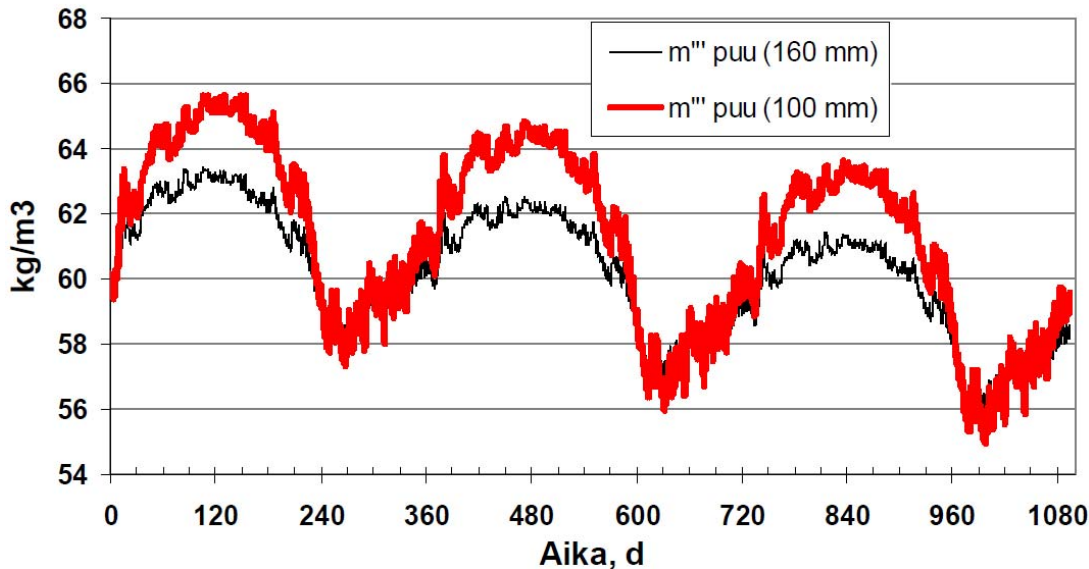
Kuva 2. SPU eristeiset puurunkoiset ulkoseinät. Kuvassa ei ole esitetty sisäverhouslevyjä eikä ulkoverhoususta. Rakenteet eroavat toisistaan eristeiden paksuuden osalta. Oikeanpuolisessa rakenteessa voidaan käyttää selvästi pienempidimensioista puurunkoa.

Taulukko 2. Rakenteiden eri kerrosten dimensiot, lämmönjohtavuudet ja kerrosten vesihöyryn diffuusiiovastukset [6].

Materiaalikerros	Paksuus, mm	Lämmönjohtavuus $\lambda_{design}$ , W/(K m)	Kerroksen vesihöyrynvastus $S_d$ , m
Puu	160/100	0,12	f (RH)
PU-eristys	100	0,024	5
PU-eristys	160	0,024	8
Alumiinipinnoite	1	-	1500

### 3.3.1 Tulokset

SPU-eristeen ja puun rajapinta kuivui molemmissa tapauksissa jatkuvasti, eikä se siten ole kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittinen. Alumiinipintaisen eristeen kautta ei pääse kosteutta puuhun ja lämpötilaerosta johtuen puun kosteus on pääsääntöisesti kuivumassa ulospäin.[6]



Kuva 3. Puurungon keskimääräisen kosteuspitoisuuden kehitys kolmen vuoden tarkastelujakson aikana kahdella eri puurungon paksuudella. [6]. Vastaavanlaiset kuvaajat määritettiin myös muista tutkituista rakenteista.

Puurungon tuuletusrakoon rajoittavan pinnan lämpötila- ja kosteusolojen perusteella laskettiin pinnan homeindeksi. Laskennallinen homeindeksi jäi molemmissa tapauksissa tasolle 0,5, mikä ei siis kuvaa edes alkavan homekasvun riskiä. [6]

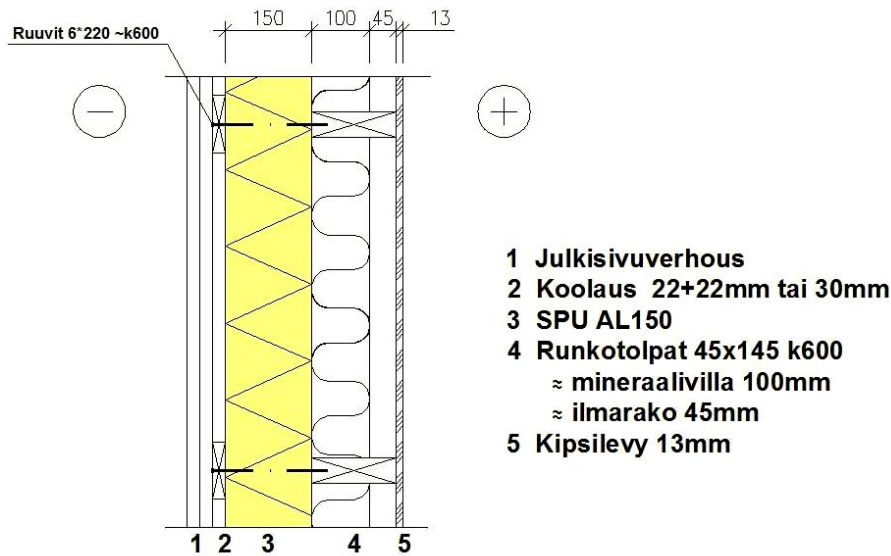
### 3.3.2 Johtopäätökset

Eristeen uloimmassa kerroksessa oleva puu kuivuu tuuletusrakoon päin ja koko rakenteen kosteus on vuositasolla laskeva alun 80 % (RH) tasapainotilasta lähtien. Puurungon olosuhteet tuuletusraossa eivät poikkea siitä, mitä puuosien olosuhteet tuuletusraoissa yleensäkin ovat, eivätkä ne edusta homeen kasvuriskiä. Rakenteen toimivuuden riskit ovat samoja kuin yleensäkin tuuletetuilla rakenteilla. [6]

## 3.4 Puurunkoinen seinä SPU-eristeellä ja mineraalivillalla eristettynä

Mallinnettu rakenne on tyypiltään tuuletettu puurunkoinen ulkoseinä, jossa rungon ulkopuolisena eristeenä on 150 mm SPU-eristettä ja runkopuiden välissä 100 mm mineraalivillaa (kuva 4). Mallinnuksessa käytettiin EN standardin kosteusluokka 2:n arvoja. Tarkastelu suoritettiin kahdelle tapaukselle: paperipintaiselle ja alumiinipintaiselle eristeelle. Tarkastelussa selvitettiin kokonaiskosteuden muutoksen lisäksi mineraalivillan ja SPU-eristeen rajapinnan olosuhteet. Sisäpinnan kipsilevy oletettiin maalatuksi. Taulukossa 3 on esitetty laskennassa käytetyt materiaalien ominaisarvot.





Kuva 4. Sekaeristetty puurunkoinen ulkoseinä.

Taulukko3. Rakenteiden eri kerrosten dimensiot, lämmönjohtavuudet ja kerrosten vesihöyryn diffuusiovastukset [7].

Materiaalikerros	Paksuus, mm	Lämmönjohtavuus $\lambda_{design}$ , W/(K m)	Kerroksen vesihöyrynvastus $S_d$ , m
Kipsilevy, maalattu	13	0,23	0,4
Mineraalivillaeristys	100	0,036	0,2
PU-eristys	150	0,024	7,5
Alumiinipinnoite	1	-	1500

### 3.4.1 Tulokset

Koko tarkastelujakson ajan molempien rakenteiden kokonaiskosteus oli vuositasolla laskeva, ts. rakenne kuivui kaiken aikaa. Suhteellisen kosteuden tasot kriittisessä rajapinnassa olivat laskevia ja alun jälkeen alle RH 80%. Tulosten perusteella rakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia ja turvallisia. [7]

Höyrynsuluttomassa tapauksessa toimivuus perustuu SPU eristeen hyvään lämmöneristyskykyyn ja diffuusin kosteudensiirron vastukseen. Rajapinnan lämpötila asettuu paksumman ja paremmin eristävän SPU-eristeen vuoksi niin korkeaksi, että sisäpuolelta tuleva kosteus ei nosta rajapinnan suhteellisen kosteuden arvoa toimivuuden kannalta liian korkeaksi. Jos rakenteessa on sisäpuolinen höyrynsulku, on sen kosteustekninen toimivuus vielä parempi. Tällöin SPU eristeen ei ole suositeltavaa olla alumiinipintainen. [7]

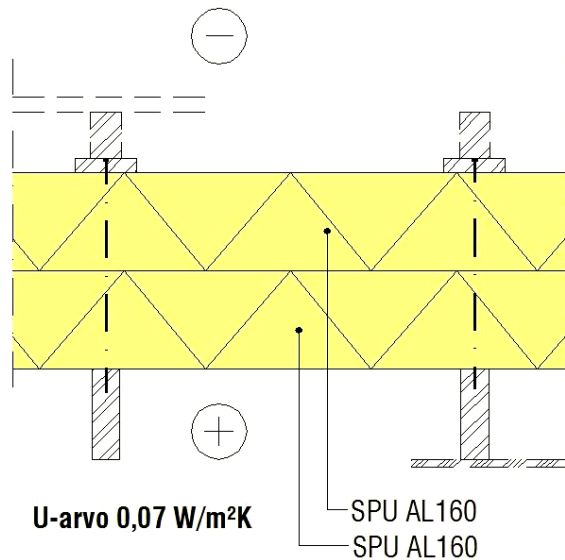
### 3.4.2 Johtopäätökset

Tarkasteltu suunnitelman mukaan toteutettu, ulkopuolelta tuuletettu eristerakenne on höyrynsuluttomanakin toimiva, kun rakenne on Suomen ilmastossa ja asuinkäyttöön tarkoitettussa sisäilman kuormitusoloissa. Kosteusturvallisuus paranee käyttämällä sisäpuolista höyrynsulkua. Tällöin ei kuitenkaan ole suositeltavaa käyttää SPU AL eristettä. [3,7]

Rakenteen toimivuuden riskit ovat samoja kuin yleensäkin tuuletetuilla rakenteilla [7].

### 3.5 SPU eristeinen yläpohja

Rakenne koostui kahdesta 160 mm paksusta SPU AL levystä, joiden alapuolella oli puinen kannatinpalkkisto. Mallinnuksessa yläpohjan tuuletus on oletettu riittäväksi [8]. Rakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 5. Sisäilman kosteusluokkana käytettiin standardin EN 13788 kosteusluokka 2:n arvoja [8]. Mallinnuksessa käytettiin 160 mm paksulle PU-eristykselle ja alumiinipinnoitteelle samoja materiaaliominaisuusarvoja kuin mm. taulukossa 2 on esitetty.



Kuva 5. SPU eristeinen yläpohjarakenne.

#### 3.5.1 Tulokset

Toimivuuden kannalta kriittinen kohta on eristeiden välinen rajapinta, jos sinne pääsee kosteutta. Rajapinnan olosuhteet pysyivät kuitenkin koko tarkastelujakson homeen kasvun alueen alapuolella.[8]

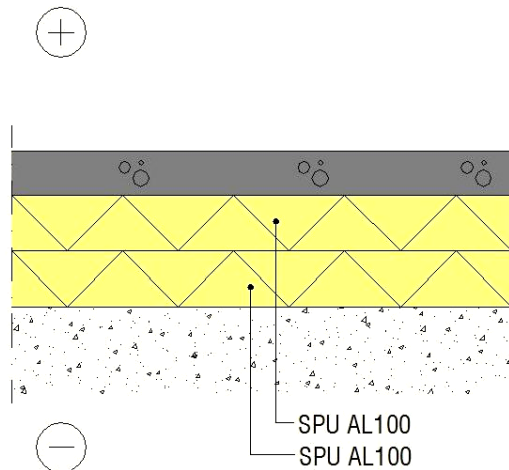
#### 3.5.2 Johtopäätökset

Tarkasteltu yläpohjarakenne on kosteusteknisesti toimiva. Mahdolliset riskit liittyvät rakenteen sisäpuolen höyryn- ja ilmatiivyyden heikentymiseen, mikä voi aiheuttaa kostean sisäilman tunkeutumisen diffuusiona tai vuotoilmavirtauksen kuljettamana rakenteeseen. Riittävä sisäpuolinen tiiviys on tässä rakenteessa helposti varmistettavissa. Tavanomaista parempi lämmönläpäisykerroin ei aiheuta lisäriskiä rakenteen toimintaan.[3,8]

### 3.6 SPU eristeinen maanvarainen alapohjarakenne

Mallinnuksen kohteena olevassa rakenteessa oli 80 mm teräsbetonilaatta ja sen alla kaksi 100 mm kerrosta SPU AL eristettä. Lämmöneristeen alla on oletuksena oikein tehty, kapillaarikatkoin ja salaojituksin varustettu pohja [9]. Rakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 6.

Rakenteen selväpiirteisyyden takia sitä ei tarvinnut analysoida laskennallisesti vaan toimivuuden selvitys tehtiin asiantuntemukseen perustuen [9].



**U-arvo 0,09 W/m<sup>2</sup>K**

Kuva 6. SPU eristeinen maanvarainen alapohjarakenne.

### 3.6.1 Tulokset ja johtopäätöksiä

Edellä kuvattu alapohjarakenne on kosteusteknisesti toimiva. Toimivuuden edellytykset ovat samat kuin yleensäkin maanvaraisissa ja höyrinsulullisissa alapohjarakenteissa [9]:

- Betonilaatan riittävä kuivuminen ennen pinnoitusta on varmistettava
- On huomattava, että käytönaikainen kuivuminen tapahtuu betonilaatasta ainoastaan ylöspäin pinnoitteen läpi.
- Kapillaarikatko ja salaojituskerrokset on tehtävä oikein
- Rakenne on ilmatiivis

Hyvin lämpöä eristävän rakenteen vaikutukset routasuojaukseen on erikseen varmistettava [9].

## 4. Yhteenveto

Kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi SPU Systems Oy on teettänyt muutamille polyuretaanieristeisille matalaenergia- ja passiivitason rakenteille laskennallisen mallinnuksen VTT:llä. Sisäilman kosteuskuormitus valittiin standardin EN 13788 kosteusluokan 2 tai 3 arvoja riippuen rakenteista. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jyväskylän vuoden 1979 säätietoja. Sateen, auringon säteilyn tai konvektion vaikutuksia ei huomioitu.

Yleisesti voidaan todeta, että tässä esitetyillä tai muilla vastaavatyypisillä SPU-rakenteilla ei esiintynyt kohonnutta riskiä kosteusteknisessä toimivuudessa. Mahdolliset riskit syntyvät itse rakentamisen huolellisuudesta ja oikein tehdyistä suunnitelmista pitäen sisällään rakenneleikkaukset että detaljien suunnittelun. Näkemyksemme mukaan ja kuten edellä esitetyistä tarkastelluista rakenteista voitiin havaita, hyvä lämmöneristyskyky ei aiheuttanut kohonnutta riskiä ts. riskitasoja ajatellen ollaan samalla tasolla, vaikka rakenteiden lämmöneristysominaisuudet paranevat huomattavasti.

Jäykkien polyuretaanieristeiden ominaisuudet, sekä rakennusfysikaaliset että asennustekniset ominaisuudet, ovat kuitenkin sellaiset, että niillä on helppo toteuttaa ilman- ja höyryntiiviitä rakenteita. Lisäksi umpisoluiset PUR eristeet sietävät hyvin kosteutta eivätkä menetä ominaisuuksiaan pitkäaikaisessaan kosteusrasituksessa.

Alkuperäisiä tutkimuksia voi kokonaisuudessaan tiedustella SPU Systems Oy:stä.

## Lähdeluettelo

- [1] EN 13165 2001. Thermal insulation products for building – Factory made rigid polyurethane foam (PUR) products – Specification.
- [2] PU-Suunnittelukansio
- [3] Kooste SPU Systems Oy:n passiivienergiatasonrakenteiden kosteusteknisen toimivuustarkastelun tuloksista. Tutkimusselostus Nro VTT-S-01985-09. 20.3.2009
- [4] SPU Systems Oy:n betonikuorisen passiivienergia-seinän kosteustekninen toimivuus. Tutkimusselostus Nro VTT-S-10928-08. 12.12.2008
- [5] 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. Vinha, Juha. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere 2007.
- [6] SPU-eristeisen puurunkoseinän kosteustekninen toimivuus. Tutkimusselostus Nro VTT-S-00428-09. 23.1.2009
- [7] SPU-Systems Oy:n SPU-eristeellä ja mineraalivillalla eristetyn seinärakenteen kosteustekninen toimivuus. Tutkimusselostus Nro VTT-S-00396-09. 23.1.2009
- [8] SPU-eristeisen yläpohjan kosteustekninen toimivuus. Tutkimusselostus Nro VTT-S-00430-09. 23.1.2009
- [9] SPU-eristeisen passiivienergiatason alapohjarakenteen kosteustekninen toimivuus. Tutkimusselostus Nro VTT-S-00434-09. 23.1.2009

## Ilmastonmuutoksen vaikutukset matalaenergiarakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa – uusi FRAME-projekti

Juha Vinha<sup>1</sup> ja Ari Venäläinen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

<sup>2</sup> Ilmatieteen laitos

### Tiivistelmä

Odotettavissa oleva ilmastonmuutos heikentää vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa monin tavoin. Keskilämpötila nousee, mikä lisää homeen kasvulle otollisia olosuhteita varsinkin syys- ja kevät aikaan. Lämpötilan nousu lisää talvella myös nollarajan ohituspäiviä, mikä rasittaa julkisivurakenteita ja lisää mm. betonirakenteiden pakkasrapautumista. Sademäärät lisääntyvät, jolloin julkisivurakenteet kastuvat aiempaa enemmän. Tämä lisää entisestään jäätymis-sulamissykliä haittavaikutusta. Pilvisuus lisääntyy talvella ja ilman suhteellinen kosteus nousee, jolloin rakenteiden kuivuminen hidastuu. Tämä lisää edelleen homeen kasvulle otollisia olosuhteita rakenteiden ulko-osissa.

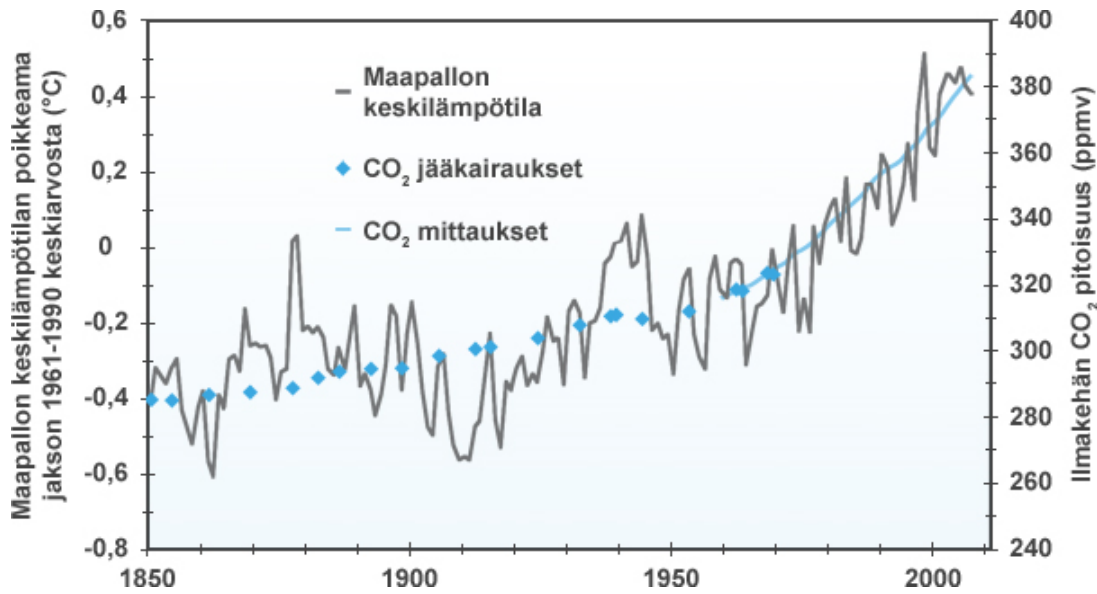
Vaipparakenteiden lisäeristäminen tuo vielä omat haasteensa rakenteiden toimintaan, koska lämmöneristykseen parantaminen viilentää rakennuksen ulkovaipan ulko-osia, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski niissä lisääntyy. Samasta syystä myös rakenteiden vikasietoisuus heikkenee. Lisääntynyt lämmöneristys voi heikentää myös rakennusaikaisen kosteuden kuivumista rakenteesta.

Lämmöneristykseen lisääntyessä myös monet rakennetyypit ja tuotantotekniikat muuttuvat. Uusissa rakennetyypeissä voi olla erilainen runkorakenne, lämmöneristysmateriaali, liittymädetaljit, kiinnitysmenetelmät jne., joista ei ole aiempaa kokemusta. Tämä lisää osaltaan riskiä kosteusongelmien muodostumiselle.

Syksyllä 2009 käynnistetty FRAME-projekti pyrkii selvittämään ilmastonmuutoksen vaikutuksia matalaenergia- ja passiivitalojen rakennusfysikaalisessa toiminnassa ja etsimään rakenteellisia tai muita teknisiä ratkaisuja, joilla vaipparakenteiden toimintaa voidaan parhaiten parantaa. Tutkimustuloksia on tarkoitettu käyttämään tausta-aineistona laadittaessa uusia lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiä ja -ohjeita.

### 1. Johdanto

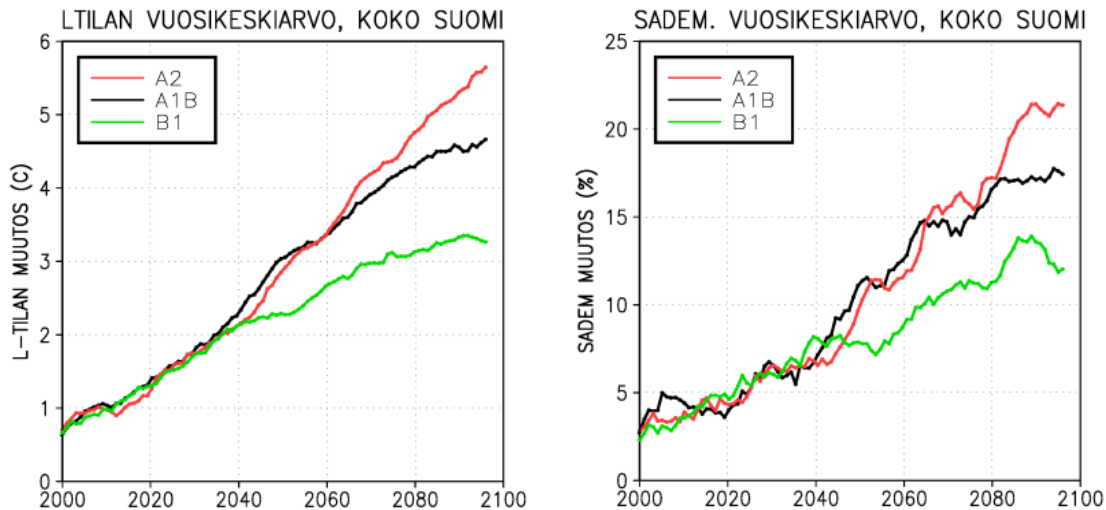
Ilmastolla on suuri vaikutus rakennusten ja rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Yleisimmin ilmastonmuutoksen ymmärretään tarkoittavan ilmaston lämpenemistä, mutta ilmastonmuutos pitää sisällään myös muita asioita. Ilmastonmuutoksen on arvioitu vaikuttavan lämpötilan lisäksi myös sateisiin, tuulioloihin, pilvisyyteen, ilman kosteuteen ja auringon säteilymääriin. Ilmastonmuutoksen oletetaan tämän hetkisen tiedon mukaan johtuvan lisääntyneistä kasvuhuonekaasupäästöistä kuten hiilidioksidista CO<sub>2</sub> (kuva 1). Sen lisäksi ilmastossa on paljon myös luonnollista vaihtelua. Ilmastonmuutos vaikuttaa sekä globaalisesti että alueellisesti.



Kuva 1. Maapallon keskilämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden muutokset havaintotietojen perusteella. Harmaa käyrä esittää keskilämpötilan poikkeamia jakson 1961–90 keskiarvosta. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet, jotka on analysoitu Etelämantereen jäätikkökairauksista, on merkitty sinisillä neliöillä. Sininen yhtenäinen viiva kuvaa suoraan ilmakehästä mitattuja hiilidioksidipitoisuuksia. (lähde: Ilmatieteen laitos)

## 2. Ilmastonmuutoksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa

Ilmastonmuutoksen ennustettavuutta voidaan arvioida erilaisilla ilmastomalleilla. Maailmanlaajuisesti erilaisia ilmastomalleja on olemassa useita. Ilmastonmuutosta arvioitaessa ilmastomalleihin liittyy olennaisena osana tulevaisuuden päästöskenaariot. Eri päästöskenaarioissa arvioidaan erilaisia olettamuksia mm. tulevasta väestön, talouden ja energiatuotantotapojen kehityksestä ja niiden perusteella arvioidaan kasvihuonekaasupäästöjen kehittymistä. Eri skenaarioissa kasvihuonekaasupäästöissä on suuria eroja. Yleisimmin ilmastomuutosarvioita tehtäessä käytetään A2-, B1- tai A1B-skenaarioita. A2-skenaario edustaa pessimististä tulevaisuuden näkymää mm. kasvihuonepäästöjen suhteen, B1-skenaario on vastaavasti optimistinen ja A1B-skenaario edustaa näiden kahden em. skenaarion välimuotoa. Käytettäessä ilmastonmuutoksen arvioinnissa eri päästöskenaarioita, saadaan ilmastomuutokselle ja sitä kautta mm. ilmaston lämpenemiselle erilaisia tulevaisuuden arvioita. Suomessa mm. Ilmatieteen laitos on tehnyt erilaisilla ilmastomalleilla ja päästöskenaarioilla ennusteita ilmastonmuutoksesta. Tyypillisesti ennusteet on tehty eri ilmastomallien keskiarvoina ja ne on esitetty erikseen eri kasvihuonekaasuskenaarioille (kuva 2).



Kuva 2. Suomen vuotuisen keskilämpötilan (vasen kuva) ja sademäärän (oikea kuva) muuttuminen v. 2000–2100 verrattuna ilmastollisen normaalijakson 1971–2000 keskiarvoon. Ennusteet ovat 19 eri ilmastomallin tulosten keskiarvoja, ja ne on esitetty erikseen kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle (B1, A1B ja A2). [1]

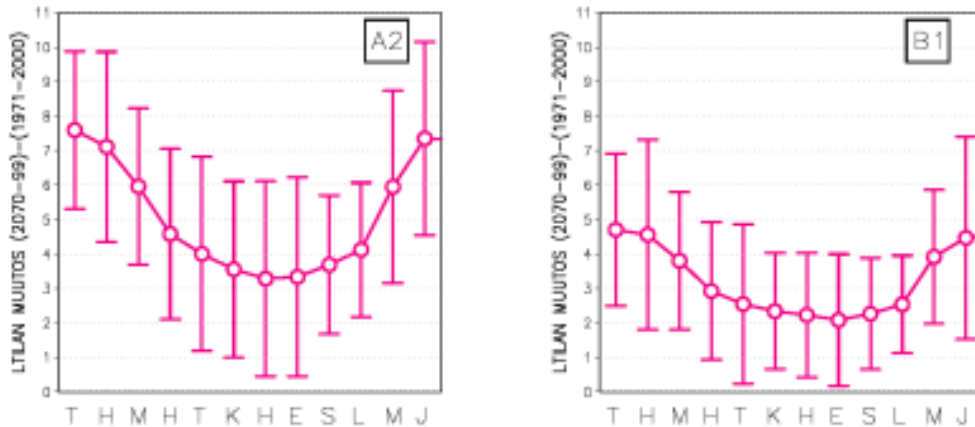
Keskilämpötila ja sademäärä nousevat kaikissa päästöskenaarioissa suunnilleen yhtä paljon ja yhtä nopeasti vuoteen 2040 asti. Selvemmin erot ilmastomuutosta ajatelleen eri päästöskenaarioiden mukaan tulevat tapahtumaan tämän vuosisadan puolenvälin jälkeen (ks. kuva 2). Rakennusten elinkaari on tyypillisesti 50–100 vuotta, joten rakennusten ja rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tulee tarkastella tällä samalla aikajänteellä. Tällöin nyt rakennettavien rakennusten elinkaaresta merkittävä osa sijoittuu ajanjaksoon, jonka ilmastomuutoksesta on olemassa useita eri skenaarioita.

Nykyisten ilmastomallien perusteella arvioidaan, että tämän vuosisadan loppupuolella terminen talvi lyhenee Suomessa oleellisesti ja Lounais-Suomesta talvi voi kadota kokonaan. Talven tilalle erityisesti etelässä tulisi pitenevä syksy. Syksy on nimenomaan rakenteiden homehtumisen kannalta kriittisintä aikaa jo tällä hetkellä, joten homeen kasvulle otolliset olosuhteet tulevat lisääntymään rakenteiden ulko-osissa. Tämä ilmiö on havaittu jo nyt muutamien viime vuosien aikana.

Etelä-Suomen ilmasto tulisi muistuttamaan enemmän nykyistä Keski-Euroopan ilmastoja ja vastaavasti Pohjois-Suomen ilmasto nykyistä Etelä-Suomen ilmastoja. Tällä hetkellä Keski-Euroopassa ulkoilman lämpötila voi olla melko pitkiäkin aikoja korkeampi kuin rakennuksen sisäilman lämpötila. Lämpötilan nousu ja lisääntyvät sateet nostavat ulkoilman vesihöyrypitoisuuden ajoittain korkeammaksi kuin sisäilmassa. Tästä johtuen kosteutta siirtyy vaipparakenteissa ulkoa sisäänpäin varsinkin niissä rakennuksissa, joissa sisäilmaa jäähdytetään. Tällöin kosteus voi tiivistyä ajoittain rakenteen lämpimällä puolella olevan höyrynsulun ulkopintaan tai synnyttää höyrynsulun taakse homeen kasvulle otolliset olosuhteet. Tämä ilmiö onkin jatkossa otettava entistä paremmin huomioon höyrynsulun vesihöyrynvastusta mitoitettaessa.

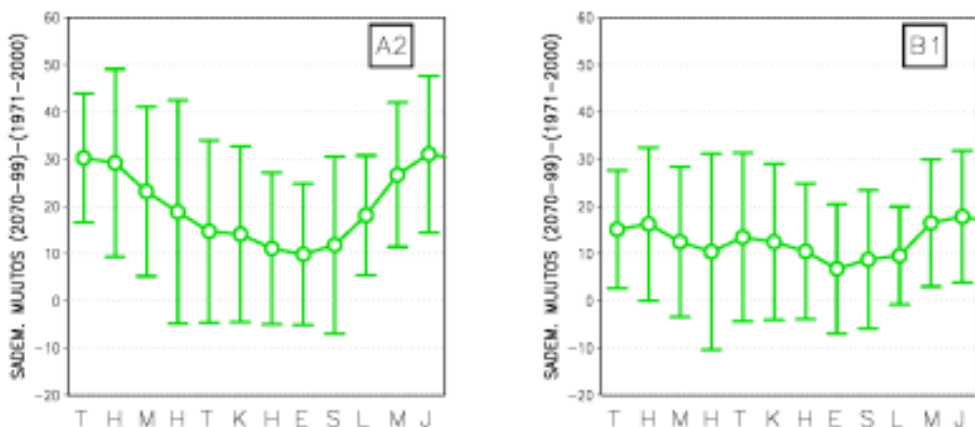
Vuoteen 2100 asti olevien ennusteiden mukaan ilmasto ei Suomessa muutu tasaisesti eri vuodenaikoina. Ilmaston lämpeneminen talvella on arvioitu olevan selvästi voimakkaampaa kuin kesällä (kuva 3). Keskimäärin talvella A2-skenaariion mukaan lämpötila tulisi nousemaan 7 °C ja B1-skeenariossa 5 °C. Kesällä lämpötilan nousu olisi n. 3 °C. Talvella nollarajan ohituspäivät, eli päivät jolloin lämpötila on sekä nollan ylä- että alapuolella, tulevat lisääntymään. Tällä on suuri

merkitys erityisesti vaipparakenteiden ulko-osien kestävyuden kannalta, varsinkin kun samaan aikaan rakenteiden kosteuspitoisuus on suuri. Jäätymis-sulamissyklit rasittavat rakenteita erityisen paljo ja lisäävät mm. betonirakenteiden pakkasrapautumista. Keväällä ja syksyllä nollarajan ohituspäivät tulevat keskimääräisen lämpötilan nousun johdosta sen sijaan laskemaan.



Kuva 3. Keskilämpötilojen muutos Celsius-asteina Suomessa vuoden eri kuukausina, kun verrataan jaksoa 2070–2099 jaksoon 1971–2000. Käyrä esittää 19 eri ilmastomallin ennustamien muutosten keskiarvoa ja pystypalkit muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on annettu pessimististä A2- ja oikeanpuoleisessa optimistista B1-skenaariota vastaavat muutokset. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen yli laskettuja keskiarvoja. (lähde: Ilmatieteen laitos)

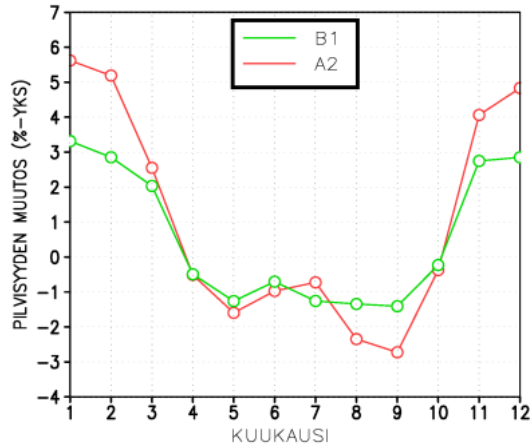
Sademäärän ennustetaan lisääntyvän kaikkina vuodenaikoina, kuitenkin kesällä vähemmän kuin talvella (kuva 4). Talvella sademäärät tulisivat lisääntymään 10–40 %. Kesäisten rankkasateiden on myös ennustettu voimistuvan. Tällä on merkitystä rakenteiden toimintaan, koska rankkasateet kastelevat esimerkiksi ulkoseinärakenteita selvästi ”normaalia” sadetta enemmän.



Kuva 4. Sademäärän muutos prosenttiyksikköinä Suomessa vuoden eri kuukausina, kun verrataan jaksoa 2070–2099 jaksoon 1971–2000. Käyrä esittää 19 eri ilmastomallin ennustamien muutosten keskiarvoa ja pystypalkit muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on annettu pessimististä A2- ja oikeanpuoleisessa optimistista B1-skenaariota vastaavat muutokset. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen yli laskettuja keskiarvoja. (lähde: Ilmatieteen laitos)



Pilvisyyden oletetaan lisääntyvän talvella (kuva 5). Sateet ja pilvisyyden lisääntyminen nostavat myös ilman suhteellista kosteutta talviaikaan, mikä pienentää rakenteiden kuivumispotentiaalia. Kesällä pilvisuus voi jopa vähentyä, jolloin suhteellinen kosteus saattaa hieman laskea nykytilanteeseen verrattuna. Ilman vesihöyrypitoisuus voi kuitenkin nousta sekä talvella että kesällä, koska ilman lämpötila on korkeampi.



Kuva 5. Kokonaispilvisyyden muutos prosenttiyksikköinä Keski-Suomessa vuoden eri kuukausina, kun verrataan jaksoa 2070–2099 jaksoon 1971–2000. Punaiset käyrät ilmaisevat A2-skenaariota ja vihreät B1-skenaariota vastaavia muutoksia. Kuva perustuu 19 eri ilmastomallin tuloksiin. [1]

Auringonsäteilyn ennustetaan vähenevän talvella lisääntyvän pilvisyyden seurauksena. Auringonsäteilyn väheneminen heikentää rakenteiden kuivumista entisestään. Kesällä auringonsäteilyn määrä voi jonkin verran lisääntyä pilvisyyden vähentyessä, mikä puolestaan voi lisätä rakennusten jäähdytystarvetta auringon lämmittäessä ikkunoiden kautta rakennuksen sisäilmaa. Rankkasateet ja auringonsäteilyn lisääntyminen voivat aiheuttaa voimakkaampia lämpötila- ja kosteusmuodonmuutoksia julkisivuille lisäten niiden halkeiluriskiä.

Tuulisuuden osalta ilmastomallien antamat ennusteet poikkeavat toisistaan. Jotkut ilmastomallit tarjoavat meille tulevaisuudessa tuulisempaa ilmastoa, mutta toisissa malleissa tuulet eivät voimistu. Nykyisten mitoituksessa käytettävien tuulikuormien voidaan katsoa olevan kuitenkin riittäviä myös seuraavan sadan vuoden aikavälillä tarkasteltuna.

Koska ulkoilman vesihöyrypitoisuuden ennustetaan nousevan varsinkin talviaikaan ulkolämpötilan nousun myötä, on sillä vaikutusta myös sisäilman kosteusolosuhteisiin. Kosteampaa ilmaa tuodaan ilmanvaihdon mukana sisälle, jolloin se nostaa sisäilman suhteellista kosteutta. Tällä on myönteinen vaikutus sisäilman olosuhteisiin talvella, koska nykyisin sisäilman kosteus on talvella alhainen ja asukkaat kärsivät usein liian kuivasta sisäilmasta. Jos vesihöyrypitoisuus nousee myös kesällä, tämä voi lisätä rakenteiden homehtumisriskiä varsinkin jäähdytetyissä taloissa, koska suhteellinen kosteus saattaa nousta vaipparakenteiden sisäpinnoilla homeen kasvun kannalta suotuisalle alueelle.

On arvioitu, että ilmaston lämpenemisen seurauksena lämmitysenergian tarve Suomessa tulisi vuoteen 2050 mennessä vähenevään 10–14 % vuosiin 1961–1990 verrattuna. Tässä vähennyksessä ei ole otettu huomioon vaipan lisälämmöneristämisen vaikutuksia. Vaikka ilmasto lämpeneekin keskimäärin, esiintyy kuitenkin myös tulevana vuosikymmeninä kylmiä jaksoja, joiden aikana lämmitysenergiaa tarvitaan runsaasti.

### 3. Lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa

Uudisrakentamista koskevia lämmöneristys- ja energiatehokkuusmääräyksiä on tarkoitus tiukentaa lähivuosina Suomessa. Lämmöneristykseen lisääminen heikentää kuitenkin joidenkin vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja joissakin tapauksissa myös rakenteiden lämpötekniistä toimintaa [2].

Lämmöneristykseen parantaminen viilentää rakennuksen ulkovaipan ulko-osia, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski niissä lisääntyy. Samasta syystä myös rakenteiden vikasietoisuus heikkenee, jos rakenteisiin pääsee ajoittain kosteutta väärin toteutetuista detaljeista. Tässä suhteessa riskialttiita rakenteita ovat mm. tuuletetut yläpohjat, ryömintätilaiset alapohjat ja varsinkin massiivirakenteet, joihin tehdään sisäpuolinen lisäeristys.

Lisääntynyt lämmöneristys voi heikentää myös rakennusaikaisen kosteuden kuivumista rakenteesta. Solumuovieristeitä käytettäessä eristekerrosten paksuntaminen lisää kerroksen vesihöyrynvastusta, jolloin rakenteiden kuivuminen eristeen läpi hidastuu. Toisaalta paksumpi lämmöneristekerros voi jo itsessään sisältää rakennusaikaista kosteutta enemmän, jolloin sen kuivumisaika pitenee. Kriittisiä rakenteita tässä suhteessa ovat mm. tuulettumattomat tai heikosti tuulettuvat yläpohjat.

Lämmöneristykseen lisääntyessä myös monet rakennetyypit ja tuotantotekniikat muuttuvat. Uusissa rakennetyypeissä voi olla erilainen runkorakenne, lämmöneristysmateriaali, liittymädetaljit, kiinnitysmenetelmät jne., joista ei ole aiempaa kokemusta. Tämä lisää osaltaan riskiä kosteusongelmien muodostumiselle.

Monien vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan muuttumista on vaikea arvioida tarkasti ilman perusteellisia laskelmia. Kaikkien rakenteiden kohdalla ei ole myöskään nähtävissä selkeää raja-arvoa, jossa rakennusfysikaalisten ongelmien määrä alkaa merkittävästi lisääntyä. Monessa tapauksessa olosuhteet rakenteessa muuttuvat vain pikku hiljaa huonommiksi ja riski rakenteen home- ja kosteusongelmiin kasvaa. Toisaalta niissäkin rakenteissa, joissa tällainen kriittinen alue löytyy, se voi olla hyvin laaja riippuen valituista tarkastelukriteereistä, vallitsevista sisä- ja ulkoilman olosuhteista, käytettävistä rakenteista ja materiaaleista ja rakennustyön huolellisuudesta.

Osassa vaipparakenteita niiden kosteusteknisen toiminnan heikkenemistä voidaan eliminoida hyvällä suunnittelulla ja toteutuksella. Osassa rakenteita, kuten tuuletetuissa yläpohjissa ja ryömintätilaisissa alapohjissa, kosteustekniset riskit kasvavat kuitenkin merkittävästi hyvästä suunnittelusta ja toteutuksesta huolimatta. Tällaisissa rakenteissa on pohdittava sitä, edellytetäänkö niissä jatkossa esim. koneellinen kuivatuksen tai lämmityksen käyttöä, jotta rakenteet toimisivat tyydyttävästi.

Jatkossa on myös selvittävä tulisiko U-arvo vaatimusten vaihdella riippuen valituista rakenteista ja rakennuksen maantieteellisestä sijainnista. Rakenteellisten ja teknisten parannuskeinojen yhteydessä on aina tarkasteltava myös niiden taloudellisuutta ja ympäristövaikutuksia, jotta voidaan arvioida onko niitä mahdollista tai järkevää toteuttaa.

## 4. Uusi FRAME-projekti

Syksyllä 2009 on käynnistetty TTY:n Rakennustekniikan laitoksella uusi FRAME-projekti (Future envelope assemblies), jonka tavoitteena on selvittää ilmastonmuutoksen vaikutuksia matalaenergia- ja passiivitalojen rakennusfysikaalisessa toiminnassa Suomen ilmastossa. Tutkimus keskittyy pääasiassa eri rakennusosien lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun, mutta tutkimuksessa tarkastellaan myös vaipan lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia rakennusten jäähdystarpeeseen. Projektin muina tavoitteina on mm. määrittää rakennusosien rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta kriittisiä lämmöneristyspaksumuksia/ U-arvoja niiltä osin kuin se on mahdollista sekä selvittää millä rakenteellisilla tai muilla teknisillä ratkaisuilla rakenteiden toimintaa voidaan parhaiten parantaa, jotta riskit kosteusongelmille vähenevät.

Tutkimusten perusteella annetaan suosituksia ja ohjeita tuleviin rakennusmääräyksiin koskien vaipparakenteiden lämmöneristysmääräyksiä, lämpöhäviöiden ja energiankulutuksen laskentaohjeita ja vaipparakenteiden toteutusta. Rakennusalalle annetaan suosituksia ja ohjeita vaipparakenteiden ja liitosten turvallisista toteutustavoista Suomen ilmastossa sekä välitetään kansainvälisissä julkisissa tutkimusprojekteissa saatua tietoa eri rakenteiden toiminnasta ja ilmastonmuutoksesta tärkeiden vientimaiden ilmastossa.

Projektista on tarkoitus julkaista hankkeen lopussa kaksi tutkimusraporttia. Toisessa tutkimusraportissa esitetään suunnitteluohjeita matalaenergia-/ passiivirakenteille ja -liitoksille ja toisessa raportissa käsitellään tutkimuksen kaikki muut osa-alueet.

Projektissa tehdään yhteistyötä mm. Ilmatieteen laitoksen kanssa, jotta rakenteiden rakennusfysikaalista tarkastelua varten voitaisiin luoda kriittiset referenssivuodet tulevaisuuden ilmastossa vuosina 2050 ja 2100.

Projektissa tehdään myös laajaa kansainvälistä yhteistyötä mm. Chalmersin teknillisen yliopiston ja Lundin yliopiston kanssa Ruotsissa sekä Dresdenin teknillisen yliopiston kanssa Saksassa. Lisäksi tutkimus linkittyy kansainväliseen IEA Annex (International Energy Agency) tutkimusohjelmaan, jota parhaillaan ollaan valmistelemaan. Tässä ohjelmassa keskitytään myös ilmastonmuutoksen ja lisäeristämisen vaikutuksiin rakennusten ja rakenteiden toiminnassa.

Suuri osa projektin tarkasteluista on tarkoitus tehdä laskennallisina tarkasteluina erilaisilla rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla, joten tältä osin projektissa tehdään yhteistyötä myös erilaisten ohjelmistovalmistajien kanssa.

Rahoittajina tutkimuksessa on mm. Ympäristöministeriö ja Rakennusteollisuus RT ry:n jäsenyhdistyksiä.

### 4.1 Tutkimuksessa tehtävät tarkastelut

Tutkimuksessa tehtävät tarkastelut on jaettu eri osa-alueisiin seuraavasti:

- Julkisivut
- Rankarakenteiset ulkoseinät
- Massiivirakenteet
- Rakenteiden sisäinen konvektio
- Tuuletetut yläpohjat

- Tuulettumattomat ja vähän tuulettuvat yläpohjat
- Ryömintätilaiset alapohjat
- Maanvastaiset rakenteet
- Ikkunat ja ovet
- Kylmäsillat
- Rakennusten jäähdytys
- Liitokset ja detaljit

Laskennallisten tarkastelujen lisäksi kokeellista tutkimusta tehdään mm. rakenteiden sisäiseen konvektioon, tuuletettuihin yläpohjiin ja ryömintätilaisiin alapohjiin liittyvissä tutkimusosioissa.

## 4.2 Tutkimuksen aikataulu

Tutkimus on tarkoitus saada valmiiksi v. 2012 alkuun mennessä siten, että tulokset ovat käytettävissä Ympäristöministeriöllä ja tutkimuksessa mukana olevilla yrityksillä. Ympäristöministeriön on tarkoitus julkaista seuraavat lämmöneristys- ja energiankulutusmääräykset ja -ohjeet v. 2012 ja tämän tutkimuksen tuloksia on tarkoitus käyttää näiden määräysten ja ohjeiden tausta-aineistona.

## 5. Yhteenveto

Tuleva ilmastonmuutos nostaa mm. keskilämpötiloja ja lisää sademääriä. Lisäksi varsinkin talviaikaan pilvisuus lisääntyy, ilman suhteellinen kosteus nousee ja jäätymis-sulamissykli määrä kasvaa. Nämä ilmiöt heikentävät vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa monin tavoin lisäämällä mm. homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle otollisia olosuhteita rakenteissa, betonijulkisivujen pakkasrapautumista sekä rakenteiden kuivumisaikoja. Myös lisäeristäminen heikentää vaipan kosteusteknistä toimintaa, koska vaipan ulko-osat viilenevät ja rakenteiden kuivumisajat voivat pidentyä. Lisäksi uusien rakennetyyppien ja tuotantotekniikoiden käyttöönotto vaipparakenteissa lisäävät kosteusongelmien mahdollisuutta. Uusi FRAME-projekti pyrkii selvittämään ilmastonmuutoksen vaikutuksia matalaenergia- ja passiivitalojen rakennusfysikaalisessa toiminnassa ja etsimään rakenteellisia tai muita teknisiä ratkaisuja, joilla vaipparakenteiden toimintaa voidaan parhaiten parantaa. Tutkimustuloksia on tarkoitus käyttää tausta-aineistona laadittaessa uusia lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiä ja -ohjeita.

## Lähdeluettelo

- [1] Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A. Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:4.
- [2] Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Korpi, M., Aho, H., Lähdesmäki, K. & Aaltonen, A. Matalaenergiarakenteiden toimivuus, Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Talonrakennustekniikka, Tutkimusselostus nro TRT/1706/2008. 88 s.

## **14. Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset**

