



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

*Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.
Tutkimusraportti 140
Department of Civil Engineering. Structural Engineering.
Research Report 140*

Juha Vinha, Minna Korpi, Targo Kalamees, Juha Jokisalo, Lari Eskola, Jari Palonen,
Jarek Kurnitski, Hanna Aho, Mikko Salminen, Kati Salminen & Matias Keto

Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous



Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 140
Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering.
Structural Engineering. Research Report 140

Juha Vinha, Minna Korpi, Targo Kalamees, Juha Jokisalo, Lari Eskola, Jari Palonen,
Jarek Kurnitski, Hanna Aho, Mikko Salminen, Kati Salminen & Matias Keto

Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous

ISBN 978-952-15-2105-8 (nid.)
ISBN 978-952-15-2738-8 (PDF)
ISSN 1797-9161



Vinha Juha, Korpi Minna, Kalamees Targo, Jokisalo Juha, Eskola Lari, Palonen Jari, Kurnitski Jarek, Aho Hanna, Salminen Mikko, Salminen Kati, Keto Matias

ASUINRAKENNUSTEN ILMANPITÄVYYS, SISÄILMASTO JA ENERGIATALOUS

Tutkimusraportti 140, 148 s. + 19 liites.

Syyskuu 2009

Hakusanat: hirsitalot, kivirakenteiset talot, pientalot, kerrostaloasunnot, kenttätutkimus, ilmanpitävyys, lämpökamerakuvaus, lämpötila, suhteellinen kosteus, kosteuslisä, kosteuden tuotto, ilmanvaihtokerroin, ilmanvaihdon melu, ilmavuodot, energiankulutus, sisäilman laatu

Tiivistelmä

50 kivirakenteisen pientalon, 20 hirsitalon ja 56 kerrostaloasunnon sisäilman olosuhteita, ilmanpitävyyttä ja ilmanvaihdon toimivuutta on tutkittu kenttämittauksin vuosina 2005–2008 Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen/ Rakennetekniikan ja Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen/ LVI-tekniikan yhteistyöhankkeessa. Mittausten lisäksi tutkimuksessa on mm. mallinnettu vuotoilmanvaihtuvuutta ja tehty läpivientien ilmanpitävyyden laboratoriokeiteita.

Kivitalojen ilmavuotoluku n_{50} (2,3 l/h) oli keskimäärin parempi kuin hirsitalojen (6,0 l/h) ja aiemmassa tutkimuksessa mitattujen puutalojen (3,9 l/h). Keskimääräisen kerrostaloasunnon ilmavuotoluku oli 1,6 l/h ja keskimäärin pienimpiä tuloksia ilmavuotoluvulle saatiin betonirakenteisissa kerrostaloissa, joissa välipohja oli paikalla valettu (0,7 l/h). Talotyypin sisällä oli hajontaa ja hyvään ilmanpitävyyteen päästiin kaikissa talotyypeissä. Ilmanpitävyyksmittausten perusteella puurakenteisen yläpohjan käyttö kivirakenteisen yläpohjan tilalla lisäsi kivirakenteisen pientalon keskimääräistä ilmavuotolukua. Maanvastaisen betonilaatan ja ryömintätilaisen alapohjan välillä ei havaittu ilmanpitävyyden kannalta tilastollisesti merkitsevää eroa. Useampikerroksiset kivi- ja hirsirunkoiset talot olivat keskimäärin tiiviimpiä kuin vastaavat yksikerroksiset talot, kun vertailussa käytettiin n_{50} -lukuja. Aikaisemmin mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa tilanne oli tältä osin päinvastainen. Puurunkoisissa pientaloissa välipohjan liitokset ulkoseiniin heikentävät rakennuksen ilmanpitävyyttä merkittävästi. Kivi- ja hirsirunkoisissa pientaloissa n_{50} -lukujen pieneneminen johtui lähinnä sisätilavuuden kasvusta, koska erot q_{50} -lukujen eli ilmanläpäisylukujen osalta olivat melko pieniä.

Lämpökameralla tehdyt tutkimukset paljastivat ilmavuotoja esiintyvän pientaloissa etenkin ulkoseinän ja yläpohjan liitoksissa, ovien ja ikkunoiden liitoksissa sekä ovissa ja ikkunoissa itsessään, ulkoseinän ja välipohjan liitoksissa sekä ilmansulun läpiviennissä. Kerrostaloasunnoissa eniten ilmavuotoja esiintyi ovissa ja ikkunoissa ja niiden liitoskohdissa. Rakennusten kylmäsiltoja ei esiintynyt suuresti. Eniten kylmäsiltoja oli ikkunoissa ja ovissa ja niiden liitoksissa.

Pientalojen ilmanvaihtokerrointen keskiarvo oli 0,38 l/h ja makuuhuoneiden tuloilmavirrat keskimäärin 6,7 l/s. Etenkään tuloilmavirrat eivät yltäneet suositeltuihin lukemiin. Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokertoimet ja makuuhuoneen tuloilmavirrat olivat keskimäärin suurempia kuin pientaloissa. Suurin keskimääräinen ilmanvaihtokerroin (0,63 l/h) oli

kerrostaloasunnoissa, joissa oli keskitetty koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Näissä asunnoissa makuuhuoneen tuloilmavirrat olivat keskimäärin 10,2 l/s. Huoneistokohtaisen ilmanvaihtojärjestelmän asunnoissa tuloilmavirrat olivat keskimäärin 12,1 l/s. Ilmanvaihdon äänitasot olivat vertailuarvoihin nähden alhaiset, keskimäärin n. 23 dB(A).

Eri seinärakennetyyppien vaikutus keskimääräiseen sisälämpötilaan on erittäin pieni. Massiivirakenteisten ja kevytrakenteisten talojen välillä ei myöskään havaittu eroja. Tutkituissa massiivirunkoisissa pientaloissa oli kesällä viileämpää kuin aiemmin tutkituissa puutaloissa, koska ulkolämpötila oli viileämpi. Kerrostaloasunnoissa sisälämpötila oli merkittävästi korkeampi kuin pientaloissa. Massiivirunkoisissa pientaloissa oli vuorokauden lämpötilavaihtelu kesällä isoin hirsitaloissa. Talvella sisälämpötilan vaihtelu oli merkittävästi suurempaa kohteissa, joissa oli sähköinen lattialämmitys kuin vesikeskuslämmitteisen lattialämmön kohteissa. Lämpötilan vaihtelulla oli kohteissa suurempi vaikutus suhteellisen kosteuden tasoon kuin ulkoseinärakenteilla. Sisustuksella ja ikkunatuuletuksella on myös todennäköisesti vaikutusta sisäilman olosuhteisiin. Yleisimmiksi sisäilmasto-ongelmiksi koettiin pölyiset pinnat, riittämätön ilmanvaihto kesällä ja ilmanvaihtomelu. Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys massiivirakenteisissa pientaloissa oli hieman alhaisempi kuin aiemmassa puurunkoisten pientalojen tutkimuksessa.

Mittaustulosten perusteella kosteuslisän mitoitusarvon tulisi olla talviolosuhteissa ($\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) pientaloissa $5,0\text{ g/m}^3$ (kosteusluokka 1) ja kerrostaloissa $4,0\text{ g/m}^3$ (kosteusluokka 2). Ulkolämpötilan noustessa kosteuslisän arvo laskee siten, että $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ kosteuslisän suositeltava mitoitusarvo on $2,0\text{ g/m}^3$ pientaloille ja $1,5\text{ g/m}^3$ kerrostaloille. Kosteusluokan 1 mitoitusarvot sopivat asunnoille, joissa on keskimääräistä suurempi asumistiheys ($\sim 30\text{ m}^2/\text{asukas}$), tyydyttävä ilmanvaihto (ilmanvaihtokerroin $\geq 0,3\text{ 1/h}$) ja/ tai huoneistossa käytetään lisäkostutusta talvella siten, että suhteellinen kosteus on vähintään 25 % RH. Kosteusluokan 2 mitoitusarvot sopivat asunnoille, joissa on keskimääräinen tai sitä pienempi asumistiheys ($\sim 45\text{ m}^2/\text{asukas}$), hyvä ilmanvaihto (ilmanvaihtokerroin $\geq 0,4\text{ 1/h}$) eikä huoneistossa käytetä lisäkostutusta. Keskimääräinen kosteuden tuotto oli pientaloissa $8,5\text{ kg/päivä}$ ja kerrostaloasunnoissa $3,0\text{ kg/päivä}$. Mitattu kosteustuotto poikkesi merkittävästi asukaskyselyiden perusteella lasketusta kosteustuotosta.

Vaipan yli syntyvien paine-erojen hallitseminen ilmanvaihdolla onnistuu vain hyvin ilmanpitävässä talossa ($n_{50} < 0,4\text{ 1/h}$). Ilmanpitävyydeltään hyvän talon ilmanvaihto tulee tasapainottaa erittäin huolellisesti, jotta vältetään haitallisen suurilta paine-eroilta. Mitoituksessa käytettävä paine-ero tulee olla vähintään $\pm 10\text{ Pa}$ luokkaa.

Keskimääräinen sähkön kulutus oli kyselyn perusteella kaukolämmöllä lämmitetyissä pientaloissa $65,7\text{ kWh/m}^2$, pääasiallisesti maalämpöpumpulla lämmitetyissä pientaloissa $86,3\text{ kWh/m}^2$, suoran sähkölämmityksen pientaloissa $159,5\text{ kWh/m}^2$, varaavan sähkölämmityksen pientaloissa $157,0\text{ kWh/m}^2$ ja öljyllä lämmitetyissä pientaloissa $41,7\text{ kWh/m}^2$. Sähkön kulutus sisältää kaiken sähkön mittarilukeman perusteella. Kaukolämpö- ja öljylämmitystaloja lukuun ottamatta sähkön kulutus sisältää myös lämmityksen ja lämpimän käyttöveden valmistuksen. Pientalojen energiankulutus sisäpinta-alaa ja tilavuutta kohti vaihteli suuresti eri koekohteissa. Todennäköisimpänä selityksenä tähän ovat asukkaiden erilaiset kulutustottumukset.

Simulointitutkimuksen perusteella rakennuksen vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa lähes lineaarisesti ilmavuotoluvun n_{50} kasvaessa. Tuloksista johdettiin yksinkertaistettu laskentamalli, jota voidaan käyttää koneellisella tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetun pientalon keskimääräisen vuotoilmanvaihtokerroimen karkeaan arviointiin Suomessa. Vuotoilmanvaihtokerroimen laskentakaava energialaskentaa varten tyypilliselle

ilmastovyöhykkeillä (I–III) suojaisissa tuulioloissa tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustetulle 1-kerroksiselle pientalolle on $n_{50}/39$ ja 2-kerroksiselle pientalolle $n_{50}/24$. Vastaavasti kerrostalon vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten on $n_{50}/17$. Keskimäärin 2-kerroksisen pientalon lämmitysenergiankulutus kasvaa 7 % ja kokonaiskulutus 4 %, kun ilmavuotoluku n_{50} kasvaa yhden yksikön verran.

Putkiläpivientien eri tiivistystapojen ilmanpitävyyttä puurankarakenteessa testattiin laboratoriokeinein. Kaikilla tiivistystavoilla ja tutkituilla ilmansulkukalvoilla oli mahdollista saada aikaan hyvin ilmanpitäviä läpivientejä. Ainoastaan teippaamalla tiivistetystä usean putken läpiviennistä ei saatu tulosta läpimenevälle ilmantilavuusvirralle, koska ilmavuoto oli niin suuri. Yksittäisillä putkiläpivienneillä läpivientilaipat toimivat hyvin. Useamman putken läpivienneissä tiivistystyö on melko helposti toteutettavissa polyuretaanikauluksilla ja vaahdottamalla. Valitusta tiivistysmenetelmästä riippumatta työn huolellisuudella on merkittävä vaikutus lopulliseen ilmanpitävyyteen.



Vinha Juha, Korpi Minna, Kalamees Targo, Jokisalo Juha, Eskola Lari, Palonen Jari, Kurnitski Jarek, Aho Hanna, Salminen Mikko, Salminen Kati, Keto Matias

AIR TIGHTNESS, INDOOR CLIMATE AND ENERGY ECONOMY OF DETACHED HOUSES AND APARTMENTS

Research report 140, 148 p. + app.19 p.

September 2009

Keywords: log houses, heavyweight concrete and masonry houses, detached houses, apartments, field research, air tightness, thermal imaging survey, temperature, relative humidity, excess moisture, moisture production, air change rate, ventilation noise, air leakages, energy consumption, indoor air quality

Abstract

The indoor climate conditions, air tightness and ventilation rate of 50 detached heavyweight concrete and masonry houses, 20 log houses and 56 apartments were studied by field measurements during 2005–2008 in a collaborative project between Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering/ Structural Engineering and Helsinki University of Technology, Department of Energy Technology/ Heating Ventilating and Air-Conditioning. The study also modelled e.g. the leakage air exchange rate and laboratory tested air tightness of penetrations.

The average air leakage rate n_{50} (2.3 1/h) of detached concrete and masonry houses was better than that of log houses (6.0 1/h) and the wooden houses of an earlier study (3.9 1/h). The air leakage rate of the average apartment was 1.6 1/h; lower than average rates were measured in concrete apartment blocks with cast-in-situ intermediate floors (0.7 1/h). There was deviation between building types, but high air tightness was achieved in all types. On the basis of air tightness measurements, having a wood roof assembly instead of a heavyweight (concrete or LWC) one increased the average air leakage rate of detached concrete and masonry houses. No statistically significant difference as to air tightness was found between a ground slab and a base floor with a crawl space. Multi-storey heavyweight single-family houses were on average tighter than one-storey houses, when n_{50} -rates were compared. In the case of the earlier studied detached timber-frame houses, the situation was the opposite in this respect. In timber-frame detached houses the joints between the intermediate floor and external walls decrease air tightness considerably. In heavyweight detached houses diminution of n_{50} -rates resulted mainly from the increase of the indoor volume for the differences in q_{50} -rates were minor.

According to thermal imaging surveys, air leakages occurred in detached houses especially around joints between external walls and the roof assembly, around joints of doors and windows, in doors and windows themselves, around joints between external walls and the intermediate floor, and around air barrier penetrations. Apartments had the most air leakages around doors and windows and their joints. Cold bridges were rare – they were found mainly around windows and doors and their joints.

The average air change rate of detached houses was 0.38 1/h, and the average supply air flow rate of bedrooms 6.7 l/s. Especially the latter fell short of recommendations. The air change rates and bedroom supply air flow rates of apartments were on average higher than those of

detached houses. The highest average air change rate (0.63 l/h) occurred in apartments connected to centralised mechanical supply/exhaust ventilation. In buildings with such a system the average bedroom supply air flow rate was 10.2 l/s. In apartments with an apartment-specific system this average supply air flow rate was 12.1 l/s. Ventilation noise levels were low compared to reference values – about 23 dB(A) on the average.

The impact of wall assembly types on average indoor temperature is very small. No differences between houses of heavy- and lightweight construction were observed, either. The studied heavyweight detached houses were cooler in summer than the earlier studied wooden houses due to cooler outdoor temperature. The indoor temperature of apartments was significantly higher than that of the houses. Log houses had the largest daily temperature changes in summer among heavyweight houses. In winter, indoor temperature change was significantly greater in houses with electric floor heating than those with hot-water floor heating. Temperature changes in houses have a bigger impact on RH than the external wall assemblies. Furnishings and window airing also probably affect indoor climate conditions. Dusty surfaces, insufficient ventilation in summer, and ventilation noise were most often perceived as problems related to indoor climate. Indoor climate problems were slightly less common in the heavyweight detached houses than in their timber-framed counterparts of the earlier study.

Based on measurement results, the design excess moisture of detached houses in winter conditions ($\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) should be 5.0 g/m^3 (humidity class 1) and that of apartments 4.0 g/m^3 (humidity class 2). As outdoor temperature rises, excess moisture decreases so that the recommended design value of excess moisture at $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 2.0 g/m^3 for detached houses and 1.5 g/m^3 for apartments. The design values of humidity class 1 are appropriate for dwellings with a higher than average occupancy rate ($\sim 30\text{ m}^2/\text{occupant}$), satisfactory ventilation (ventilation rate $\geq 0.3\text{ l/h}$) and/or extra humidification in winter to ensure an RH of at least 25 %. The design values of humidity class 2 are appropriate for dwellings with an average or lower than average occupancy rate ($\sim 45\text{ m}^2/\text{occupant}$), good ventilation (ventilation rate $\geq 0.4\text{ l/h}$) where extra humidification is not used. The average moisture production of detached houses was 8.5 kg/day and that of apartments 3.0 kg/day . The measured moisture production deviated significantly from that calculated on the basis of occupant surveys.

Control of pressure differences over the envelope by ventilation succeeds only in a highly air tight building ($n_{50} < 0.4\text{ l/h}$). The ventilation of a highly air tight building must be balanced very carefully to avoid excessive pressure differences. The design pressure difference must be at least $\pm 10\text{ Pa}$.

According to a survey, the average energy consumption of district-heated detached houses was 65.7 kWh/m^2 , that of houses heated primarily by a geothermal heat pump 86.3 kWh/m^2 , that of houses heated with direct electricity 159.5 kWh/m^2 , that of houses equipped with accumulating electric heating 157.0 kWh/m^2 , and that of oil-heated ones 41.7 kWh/m^2 . The reported energy consumption was based on a meter reading. With the exception of district- and oil-heated buildings, the energy consumption figure includes electricity used to heat spaces and hot tap water. Energy consumption of detached houses per net floor area and volume varied widely. It was most probably due to the consumption habits of occupants.

On the basis of a simulation study, the leakage air exchange rate increases almost linearly as the air leakage rate, n_{50} , increases. A simplified calculation model was derived from the results which can be used to estimate roughly the average leakage air exchange rate for a Finnish detached house with mechanical supply/exhaust ventilation. The leakage air exchange rate used to calculate the energy consumption of a 1-storey detached house with a balanced ventilation system in a typical climatic zone (I–III) under wind-protected conditions is $n_{50}/39$

while the rate for a 2-storey house is $n_{50}/24$. The corresponding leakage air exchange rate for calculating the energy consumption of an apartment block is $n_{50}/17$. The average energy consumed in heating 2-storey detached house increases 7 %, and total consumption by 4 %, as the air leakage rate, n_{50} , increases by one unit.

The air tightness's of various methods of sealing pipe penetrations in a timber frame were examined by laboratory tests. Airtight penetrations could be made by all sealing methods and studied air barrier membranes. Only in the case of the tape-sealed multi-pipe penetration, the volume flow of air passing through could not be determined since air leakage was so heavy. Bushing flanges worked well with single-pipe penetrations. In the case of multi-pipe penetrations, sealing can fairly easily be effected by polyurethane collars and foaming. Independent of the selected sealing method, the thoroughness of the work has a significant impact on final airtightness.

Alkusanat

Tämä julkaisu on loppuraportti ”Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous (AISE)” -tutkimusprojektista, joka alkoi 1.3.2005 ja päättyi 31.12.2008. Tutkimuksessa on ollut mukana laaja joukko rakennusalan yrityksiä ja yhdistyksiä sekä ympäristöministeriön ja Tekesin edustajat. Tutkimus on toteutettu Tekesin yritysrahoitusprojektina, jossa yritysten koordinaattorina on toiminut Suomen Rakennustutkimus RTS Oy. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen /Rakennetekniikan (TTY) ja Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen/ LVI-tekniikan (TKK) yhteistyöprojektina.

TTY:n Rakennustekniikan laitoksella tutkimusta on johtanut yliassistentti Juha Vinha ja TKK:n Energiatekniikan laitoksella tutkimuspäällikkö Jarek Kurnitski. Professori Ralf Lindberg TTY:n Rakennustekniikan laitokselta on toiminut projektin vastuullisena johtajana. Projektin kokonaisorganisoinnista on vastannut yliassistentti Juha Vinha. Eri lukujen sisällöstä ovat vastanneet seuraavat henkilöt: luvut 1 ja 2.1: dipl.ins. Minna Korpi (TTY), luku 2.2: dipl.ins. Minna Korpi ja tekn. toht. Juha Vinha (TTY), luku 2.3: tekn. toht. Targo Kalamees (TKK), luku 2.4: dipl.ins. Lari Eskola (TKK), luku 2.5: tekn. toht. Targo Kalamees (TKK) ja dipl.ins. Minna Korpi (TTY), luku 2.6: tekn. toht. Juha Vinha (TTY), dipl.ins. Mikko Salminen (TTY), dipl.ins. Kati Salminen (TTY) ja tekn. toht. Targo Kalamees (TKK), luku 2.7: tekn. toht. Targo Kalamees (TKK), luku 2.8: tekn. yo. Matias Keto (TKK), luku 2.9: tekn. lis. Jari Palonen (TKK), luku 3: tekn. toht. Juha Jokisalo (TKK), luku 4: dipl.ins. Hanna Aho (TTY) ja luku 5: dipl.ins. Minna Korpi (TTY). Luvun 6 kirjoitukseen ovat osallistuneet kaikki edellä mainitut henkilöt. Julkaisun muut osat on pääosin kirjoittanut Minna Korpi.

Tutkimuksen yhteydessä tehtyjen koetalojen mittaukset ja tulosten kokoamisen ovat pääsääntöisesti toteuttaneet TTY:llä Minna Korpi, Mikko Salminen, Hanna Aho, Kati Salminen ja Kimmo Lähdesmäki ja TKK:lla Targo Kalamees, Lari Eskola ja Juha Jokisalo. Laboratoriomittaukset ovat tehneet Hanna Aho, Tomi Strander ja Kimmo Lähdesmäki TTY:ltä. Lisäksi tutkimuksen teossa ovat merkittäväällä tavalla avustaneet tutkija Kai Jokiranta ja tutkimusapulainen Matias Keto TKK:lta.

Osana tutkimushanketta TTY:llä on tehty suunnittelu- ja toteutusohjeet asuinrakennusten vaipparakenteiden ja liitosten ilmanpitävyyden parantamiseksi. Nämä ohjeet on julkaistu erillisenä tutkimusraporttina TTY:n julkaisusarjassa. Tämän lisäksi tutkimusprojektin yhteydessä on tehty ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje teollisille talotoimittajille, joka julkaistaan myöhemmin RT-korttina. Laadunvarmistusohjeen valmistelussa on ollut mukana useita henkilöitä TTY:ltä, TKK:lta, ympäristöministeriöstä sekä rakennusalan yrityksistä ja yhdistyksistä.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat:

Miimu Airaksinen, puheenjohtaja 12.5.2006 asti	Optiplan Oy/ NCC Rakennus Oy
Heikki Sarin, puheenjohtaja 12.5.2006 alkaen	Parma Oy
Matti Saarikoski, varapuheenjohtaja	Wienerberger Oy

Raimo Ahokas	Ympäristöministeriö
Pekka Kalliomäki	Ympäristöministeriö
Lasse Pöyhönen 21.10.2005 alkaen	TEKES
Esa Liesmäki 21.10.2005 asti	Finnforest Oy
Pasi Käkelä	H+H Finland Oy
Jyri Vänilä	Honkarakenne Oy
Kati Alakoski 15.7.2008 asti	Knauf Oy
Juha Raitio 15.7.2008 alkaen	Knauf Oy
Ismo Nieminen	Lammin Betoni Oy
Vesa Räsänen	maxit Oy Ab
Harry Hiltunen 21.10.2005 asti	Meptek Oy
Jouni Tuomi 21.10.2005 alkaen	Meptek Oy
Veijo Matilainen 12.5.2006 – 3.10.2007	Optiplan Oy/ NCC Rakennus Oy
Kimmo Liljeström 3.10.2007 alkaen	Optiplan Oy/ NCC Rakennus Oy
Mikko Huhtala	Pyhännän Rakennustuote Oy
Tiina Suonio	Rakennusteollisuus RT ry
Timo Ristamäki 21.10.2005 asti	Rakennustoimisto Palmberg Oy
Heikki Kiilholma 21.10.2005 alkaen	Rakennustoimisto Palmberg Oy
Juha Metsälä	Rakennustoimisto Pohjola Oy
Aarne Jussila	Rakennustutkimus RTS Oy/ Pientaloteollisuus ry
Harri Kemppainen	Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy
Petri Mannonen	Suomen Betonitieto Oy
Ingo Achilles 21.10.2005 alkaen	Suunnittelutoimisto Dimensio Oy
Tapani Tuominen 27.6.2008 asti	SPU-Systems Oy
Janne Jormalainen 27.6.2008 alkaen	SPU-Systems Oy
Timo Niemelä 21.10.2005 – 12.5.2006	UPM-Kymmene Puuteollisuus
Simo Koponen 12.5.2006 alkaen	UPM-Kymmene Puuteollisuus
Pekka Nurro	Wood Focus Oy/ Metsäteollisuus ry
Fred Skuthällä	YPAP Oy
Jarek Kurnitski	TKK/ LVI-tekniikan laboratorio
Juha Vinha	TTY/ Rakennustekniikan laitos
Ralf Lindberg	TTY/ Rakennustekniikan laitos

Kiitämme johtoryhmän jäseniä ja heidän sijaisiaan, tutkimuksen rahoittajia, kaikkia tutkimuksen toteuttamiseen osallistuneita ja siinä avustaneita henkilöitä sekä talojen asukkaita yhteistyöstä tutkimuksen aikana.

Tampereella ja Espoossa

22.9.2009

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	1
Abstract.....	4
Alkusanat	7
Sisällysluettelo.....	9
Merkinnät ja lyhenteet.....	11
1 Johdanto.....	13
1.1 Lähtökohta.....	13
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö.....	14
2 Kenttämittaukset.....	16
2.1 Koekohteet	16
2.1.1 Yleistä.....	16
2.1.2 Pientalot.....	16
2.1.3 Kerrostaloasunnot.....	17
2.1.4 Vertailu aiempaan tutkimukseen	18
2.2 Ilmanpitävyyden painekokeet	19
2.2.1 Tutkitut kohteet	19
2.2.2 Mittausmenetelmä	19
2.2.3 Tulokset ja niiden tarkastelu	21
2.2.4 Johtopäätökset	29
2.3 Lämpökamerakuvaukset.....	31
2.3.1 Johdanto	31
2.3.2 Menetelmät.....	31
2.3.3 Mittausmenetelmät	32
2.3.4 Tulokset.....	34
2.4 Ilmanvaihto.....	39
2.4.1 Mittausmenetelmät	39
2.4.2 Pientalojen tulokset	40
2.4.3 Kerrostalojen tulokset	43
2.4.4 Tulosten tarkastelu	47
2.5 Lämpö- ja kosteusolot	49
2.5.1 Mittaukset.....	49
2.5.2 Ulkoilmaston olosuhteet.....	49
2.5.3 Sisäilmaston olosuhteiden tavoitearvot.....	50
2.5.4 Sisäilmaston olosuhteet.....	52
2.5.5 Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkolämpötilasta ..	56
2.5.6 Sisäolosuhteiden vuorokausiamplitudi.....	59
2.5.7 Tulosten tarkastelu	62
2.6 Sisäilman kosteuslisä ja kosteuden tuotto	65
2.6.1 Mittaukset.....	65
2.6.2 Kosteuskuormien määrittäminen.....	66
2.6.3 Tulokset.....	67

2.7	Painesuhteet.....	77
2.7.1	Johdanto	77
2.7.2	Menetelmät.....	78
2.7.3	Tulokset.....	81
2.8	Energiankulutus.....	88
2.8.1	Sähkön kulutus	88
2.8.2	Ostoenergiankulutus.....	90
2.8.3	Tulosten vertailu.....	95
2.9	Asukaskyselyn tuloksia	97
2.9.1	Pientalot.....	97
2.9.2	Kerrostalot.....	100
3	Vuotoilmanvaihdon mallinnus	106
3.1	Simulointimallin kokeellinen validointi	106
3.2	Vuotoilmanvaihtokertoimeen vaikuttavat tekijät	109
3.2.1	Tutkitut tapaukset	109
3.2.2	IDA-ICE-simulointitulokset.....	112
3.2.3	Yksinkertaistettu laskentamalli	114
3.2.4	Vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten.....	116
3.2.5	Laskentamenetelmien vertailu.....	117
3.3	Energiankulutus.....	118
3.4	Tulosten tarkastelu	120
4	Läpivientien ilmanpitävyyskokeet	121
4.1	Koejärjestely.....	121
4.2	Teipatut läpiviennit sekä läpivientilaipat	123
4.3	PUR-vaahdolla tiivistetyt läpiviennit	126
4.4	Kipsilevyläpiviennit	129
4.5	Kooste läpivientien ilmanpitävyyskokeista.....	130
5	Ilmanpitävyyden ohjeita ja määräyksiä eri maissa	132
6	Yhteenveto.....	135
6.1	Kenttämittaukset.....	135
6.1.1	Ilmanpitävyys: painekokeet.....	135
6.1.2	Lämpökamerakuvaukset.....	136
6.1.3	Ilmanvaihto.....	136
6.1.4	Lämpö- ja kosteusolot	137
6.1.5	Sisäilman kosteuslisä ja kosteuden tuotto	138
6.1.6	Painesuhteet.....	138
6.1.7	Energiankulutus.....	139
6.1.8	Asukaskyselyn tuloksia	139
6.2	Vuotoilmanvaihdon mallinnus	140
6.3	Läpivientien ilmanpitävyyskokeet	140
6.4	Suosittelavan ilmapuotoluvun määrittäminen teknisin perustein.....	141
	Lähteet.....	143
	Liitteet	148

Merkinnät ja lyhenteet

A_v	rakennuksen/mitattavan osan ulkovaipan ala	m^2
B	ilmanvaihdon tasapainosta riippuva korjauskerroin	
C	kerroin	
D	rakennuksen vuotojakaumasta riippuva korjauskerroin	
E	vuotoyhtälön eksponentista riippuva korjauskerroin	
g	putoamiskiihtyvyyys	$9,81 \text{ m/s}^2$
G	kosteustuotto	kg/päivä
h	korkeus	m
H	rakennuksen korkeudesta riippuva korjauskerroin	
k	ilmavuotokertoimen korjauskerroin energialaskentaa varten	
L	ilmasto-oloista riippuva korjauskerroin	
$L_{A,eq,T}$	keskiäänitaso (A-painotettu)	dB(A)
n	asunnon ilmanvaihtokerroin	1/h
n	eksponentti	
n_{50}	ilmavuotoluku 50 Pa paine-erolla	1/h
n_v	vuotoilmanvaihtokerroin	1/h
n_v^e	vuotoilmanvaihtokerroin energialaskennassa	1/h
P	paine	Pa
ΔP	paine-ero	Pa
PMV	keskimääräinen lämpöaistimus (Predicted Mean Vote)	
PPD	lämpöolosuhteisiin tyytymättömien osuus (Predicted Percentage of Dissatisfied)	%
q_{50}	ilmanläpäisyluku 50 Pa paine-erolla	$m^3/(hm^2)$ tai $l/(sm^2)$
RH	suhteellinen kosteus	%
S1, S2, S3	sisäilmastoluokat (Sisäilmastoluokitus 2000 ja 2008)	
T	lämpötila	$^{\circ}C$
T_a	huonelämpötilan asetusarvo	$^{\circ}C$
T_{rm}	laskettavan lämpötilan vuorokauden keskiarvo	$^{\circ}C$
T_{ed-1}	edellisen vuorokauden lämpötilan keskiarvo	$^{\circ}C$
TI	lämpötilaindeksi	%
\dot{V}	ilman tilavuusvirta, ilmavuoto	m^3/h tai l/min
\dot{V}_{50}	ilman tilavuusvirta 50 Pa paine-erolla	m^3/h
\dot{V}_d	ilmanvaihdon tilavuusvirta	$m^3/päivä$
\dot{V}_p	ilmanvaihdon poistoilmavirta	m^3/s
\dot{V}_t	ilmanvaihdon tuloilmavirta	m^3/s
\dot{V}_{vi}	yksittäisen poistoventtiilin ilman tilavuusvirta	m^3/h
V	tilavuus	αm^3
W	tuulioloista riippuva korjauskerroin	
x	ilmavuotokerroin	

α	kerroin	
v	ilman vesihöyrypitoisuus	g/m^3
Δv	sisäilman kosteuslisä	g/m^3
ρ_a	ilman tiheys	kg/m^3
σ	keskihajonta	

Yleisimmät alaindeksit:

e	ulko (exterior)
i	sisä (interior)
si	sisäpinta (surface interior)

1 Johdanto

1.1 Lähtökohta

Rakennusten ilmanpitävyydestä ja sen merkittävydestä etenkin rakennusten energiatehokkuudessa on viime aikoina puhuttu paljon. Hyvällä ilmanpitävyydellä voidaan energiankulutuksen pienentämisen lisäksi mm. pienentää kosteusvaurioiden riskiä ja parantaa ilmanvaihdon säädettävyttä. Hallitsemattomien ilmavuotojen vähentäminen myös parantaa sisäilmastoa ja asumismukavuutta, kun mm. alapohjan epäpuhtaudet eivät pääse rakennuksen sisälle ja vuotoilma ei aiheuta vedon tunnetta. Hyvällä ilmanpitävyydellä on merkitystä myös paloturvallisuuden kannalta.

Tutkimuksen alkaessa Suomen rakentamismääräyksiin kaavailtiin uudistuksia, jotka ottaisivat huomioon vuotoilmanvaihdon lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. Uusissa määräyksissä korostuu entisestään rakennuksen vaipan ilmatiiviuden merkitys ja tästä muodostui tutkimuksessa keskeinen tutkimusalue. Tampereen teknillinen yliopisto ja Teknillinen korkeakoulu olivat aiemmassa ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimushankkeessa vuosina 2002–2004 tutkineet ilmanpitävyyttä, ilmanvaihdon toimivuutta ja sisäilman olosuhteita kenttämittauksin 100 puurunkoisessa pientalossa. Tutkimustietoa ilmanpitävyydestä ja sisäilman olosuhteista kaivattiin kuitenkin myös massiivirakenteisista pientaloista sekä kerrostaloista. Ilmanpitävyyden osalta haluttiin selvittää vuotokohtien jakaumaa erilaisissa taloissa, jotta ilmanpitävyyttä voitaisiin parantaa jokaisen talotyypin ongelmakohtista. Tarkoituksena on myös ollut kehittää teollisia talotoimittajia varten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje, jonka avulla talotoimittaja voisi määrittää tuotteilleen yleisesti käytettävän ilmavuotoluvun arvon ilman, että kaikkia kohteita mitataan erikseen. Tarvetta oli myös suunnitteluohjeille, joissa esitettäisiin toteutustapoja tyypillisimpien asuinrakennuksissa käytettävien rakenteiden ja liitosten ilmanpitävyyden parantamiseksi.

Kerrostaloissa koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä on yleistynyt muutaman viime vuoden aikana. Ilmanvaihdon toimivuutta uusissa kerrostaloasunnoissa ei ollut vielä tutkittu laajassa kenttämittauksessa. Myös rakennusten todelliset paine-erot ja niiden linkittyminen ilmanvaihdon toimintaan ja ilmanpitäviin rakennuksiin oli kiinnostava tutkimusalue. Tulevia energiatehokkuuden laskentamenetelmiä varten myös ilmanpitävyyden ja todellisen vuotoilmanvaihtokertoimen välisestä yhteydestä kaivattiin lisätietoa. Kiinnostusta oli myös selvittää, onko olemassa eri tekijöistä (kosteuskonvektio, painesuhteet, vedon tunne, energiankulutus) aiheutuvia ilmanpitävyyden raja-arvoja, jotka pien- ja kerrostalojen tulisi jatkossa täyttää.

Aiemmassa tutkimuksessa pientaloille määritettiin kosteusteknistä mitoitusta varten sisäilman kosteuslisän arvot. Kerrostaloasunnoilta vastaavat mitoitusrajat kuitenkin puuttuivat. Kiinnostavaa oli myös tietää, poikkeavatko sisäilman olosuhteet massiivirunkoisissa pientaloissa aiemmin tutkituista puurunkoisista taloista. Sisäilman olosuhteita on myös lähiaikoina tutkittu kansainvälisissä tutkimusyhteistyöryhmissä, joten aiheeseen oli erityistä kiinnostusta kansainvälisestikin.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Tutkimuksen tavoitteena oli

- mitata kerrostalojen ja massiivirakenteisten pientalojen tyypilliset ilmavuotoluvut uudehkossa rakennuskannassa ja vertailla tuloksia aiemmassa tutkimuksessa saatuihin tuloksiin
- määrittää tyypillinen ilmavuotojen jakauma eri vaipparakenteilla toteutetuissa pien- ja kerrostaloissa
- määrittää suositeltavat ilmanpitävyyden tavoitearvot ottaen huomioon energiankulutus, kosteuskonvektio, rakennuksen painesuhteet ja vedon tunne
- kehittää periaatteet rakennuksen ilmanpitävyyden tarkastusmenettelyksi
- antaa suunnitteluohjeita erilaisten rakennetyyppien ja liitosten ilmanpitävyyden parantamiseksi
- määrittää kerrostaloissa ja massiivirakenteisissa pientaloissa koneellisen ilmanvaihdon määrä koko asunnon osalta ja ilmanvaihdon äänitaso makuuhuoneen osalta ja verrata tuloksia aiempaan tutkimukseen
- määrittää ilmanvaihdon kehitystarpeita ja antaa ohjeita puhtaan ja toimivan ilmanvaihdon toteuttamiseksi varsinkin kerrostaloissa
- määrittää asuntojen kosteustuotto ja sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkolämpötilan funktiona kerrostaloasunnoissa
- selvittää rakennuksen vaipan vaikutusta sisäilman kosteus- ja lämpöoloihin sekä aistittuun ilman laatuun suorittamalla vertailu massiivisten hirsitalojen ja kivitalojen välillä
- määrittää lämmityskauden lämpötilan pysyvyys ja kesäaikaisten ylälämpötilojen esiintyvyys kerrostaloasunnoissa ja massiivirakenteisissa pientaloissa

Tutkimuksen kenttämittauksia varten koekohteiksi valittiin uudehkoja massiivirunkoisia pientaloja ja kerrostaloasuntoja. Mittauksia tehtiin 20 hirsitalossa, 50 kivitalossa (joista 10 kevytbetonirakenteisia, 10 kevytsoraharkkorakenteisia, 10 tiilirakenteisia, 10 betoniharkkorakenteisia ja 10 betonielementtirakenteisia) ja 56 kerrostaloasunnossa (joista osa oli betonirakenteisissa ja osa puurakenteisissa kerrostaloissa). Koekohteissa tehtiin vuosina 2005 ja 2006 kertamittaukset, joissa mitattiin rakennuksen ilmavuotoluku painekokeella ja ilmanvaihtokerroin siipipyöräänemometrillä. Kohteissa tehtiin myös pitempiaikaista lämpötilan ja kosteuden seurantaa. Osassa kohteissa seurantaa tehtiin 2 vuotta ja osassa 1 vuosi siten, että kaikissa kohteissa seuranta oli yhtäaikaaisesti käynnissä viimeisen vuoden aikana.

Osassa kohteista tehtiin tarkempia kenttämittauksia. Lämpökamerakuvaus ilmavuotojen paikantamiseksi tehtiin n. 30 % kohteista. Ilmanvaihdon äänitaso mitattiin hieman yli 60 % kohteista. Pitempiaikaisia paine-eromittauksia tehtiin kolmessa pientalossa ja kahdessa kerrostalossa. Kaikissa kohteissa tehtiin myös asukaskysely, jossa selvitettiin asukkaiden havaitsemia sisäilmaongelmia.

Ilmavuotoluvun vaikutusta rakennuksen keskimääräiseen vuotoilmanvaihtokertoimeen ja energiankulutukseen tutkittiin vuotoilmanvaihdon mallinnuksella. Mallinnuksessa käytettiin IDA-ICE-simulointiohjelmaa ja tehdyn mallin avulla tarkasteltiin lisäksi vuotoilmanvaihtoon keskeisesti vaikuttavien tekijöiden, kuten ilmasto- ja tuuliolojen, vuotojakauman, ilmanvaihtojärjestelmän tasapainon sekä rakennuksen korkeuden vaikutusta. Hankkeessa tutkittiin myös erilaisten läpivientien ilmanpitävyyttä laboratoriossa. Kokeissa tutkittiin useita erilaisia tiivistysvaihtoehtoja.

Yksi tutkimuksen keskeinen osa oli ilmanpitävien rakennedetaljien suunnitteluohjeiden laadinta ja koonti. Suunnitteluohjeet koottiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen tutkijoiden muodostamassa työryhmässä. Ryhmään kuului tutkijoita rakennusfysiikan, korjausrakentamisen, palotekniikan sekä kantavien rakenteiden suunnittelun tutkimusryhmistä. Valmiita rakennedetaljeja kommentoivat myös projektin johtoryhmän jäsenet. Suunnitteluohjeet on julkaistu omana raporttina (Aho & Korpi (toim.) 2009).

Tutkimuksen yhteydessä on kehitetty myös teollisia talotoimittajia varten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje, jonka avulla talotoimittaja voi määrittää tuotteilleen yleisesti käytettävän ilmavuotoluvun arvon ilman, että kaikkia kohteita mitataan erikseen. Ilmanpitävyyden laadunvarmistusmenettelyn kehittämistä varten perustettiin työryhmä, joka laati perusehdotuksen laadunvarmistusohjeesta. Ohjetta kommentoivat myös johtoryhmän jäsenet niin kokouksissa kuin erillisillä kommentointikierröksillä. Myös tutkimuksen ulkopuoliset rakennusalan ammattilaiset ovat antaneet ohjeeseen kommentteja. Laadunvarmistusohje julkaistaan myöhemmin RT-korttina (Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje 2009).

2 Kenttämittaukset

2.1 Koekohteet

2.1.1 Yleistä

Kenttämittauksia varten tutkimukseen valittiin 70 massiivirakenteista pientaloa ja 56 kerrostaloasuntoa. Pientalokohteet saatiin pääasiassa valitsemalla kohteet talovalmistajien asiakkaiden yhteystiedoista, mutta myös jakamalla mainoksia tutkimuksesta asuinalueilla. Sopivia kerrostalokohteita löydettiin rakennusliikkeiden ja isännöitsijöiden avulla. Kohteet sijaitsivat lähinnä Tampereen ja Helsingin seuduilla, mutta mukana oli myös muutama kohde muilta paikkakunnilta. Kohteiksi pyrittiin valitsemaan uusia, korkeintaan 10 v. vanhoja taloja, joissa olisi koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä.

Kenttämittauksiin kuului

- ilmanpitävyyden mittaus painekokeella
- ilmanvaihdon poistoilmamäärien mittaus
- ilmanvaihdon äänitasojen mittaus
- lämpötila- ja RH-dataloggereiden asennus mittauksia varten
- asukaskyselyn tekeminen
- lämpökamerakuvaus ja paine-erojen pitkäaikaisseuranta
- rakennusten pinta-alojen, tilavuuksien ja rakenneratkaisujen dokumentointi

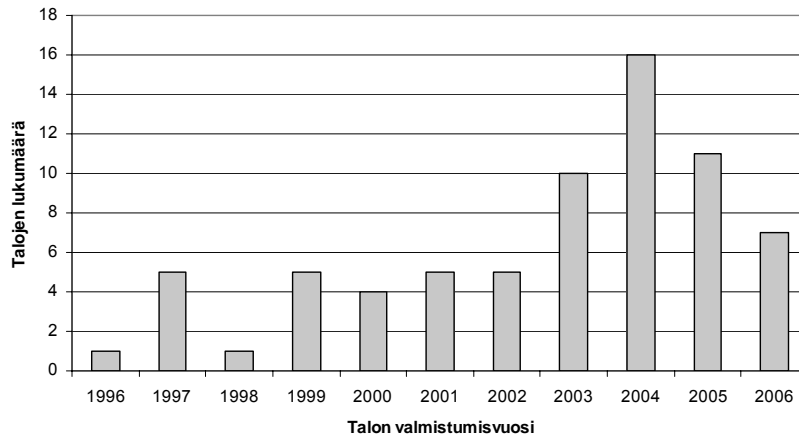
Kenttämittausten tulokset on esitetty luvuissa 2.2–2.9. Pääsääntöisesti mittaukset tehtiin kaikissa koekohteissa lämpökamerakuvausta, ilmanvaihdon äänitasomittausta ja paine-eromittausta lukuun ottamatta. Kussakin luvussa on kerrottu tarkemmin tarkasteltujen talojen lukumäärä. Kustakin pientalo- ja kerrostaloasuntokohteesta käytetään raportissa nelinumeroista koodia.

Noin puolessa koekohteista kertamittaukset tehtiin ja lämpötilan ja kosteuden seuranta aloitettiin kesäkaudella 2005. Lopuissa kohteissa mittaukset aloitettiin kesäkaudella 2006. Lämpötilan ja kosteuden seuranta kohteissa päättyi heinäkuun 2007 lopussa. Lämpökamerakuvaus tehtiin kohteissa talvikausina 2006 ja 2007.

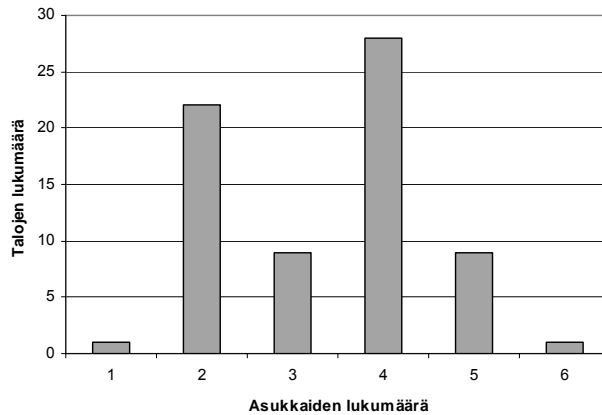
2.1.2 Pientalot

Mitattujen 70 pientalokohteen perustiedot on koottu taulukkoon liitteessä 1. Pientalojen ryhmä koostui 20 hirsitalosta, 10 kevytbetonitalosta, 10 kevytsoraharkkotalosta, 10 tiilitalosta, 10 betoniharkkotalosta ja 10 betonielementtitalosta. Mainittu materiaali kuvaa pääasiallista ulkoseinäateriaalia, mutta osassa taloista kellarikerros oli eri materiaalia kuin muut kerrokset. Useampikerroksisissa hirsitaloissa ylin kerros oli usein puurakenteinen. Rakennusten yläpohja oli useimmiten puurakenteinen, 15 talossa yläpohja oli kivrakenteinen.

Koekohteiden keskiarvoikä mittauksia aloittaessa oli 3 vuotta ja mediaani 2 vuotta (kuva 2.1.1). Pientalokoekohteissa asui keskimäärin 3,4 asukasta (kuva 2.1.2). Suurimmassa osassa kohteista oli koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Viidessä kohteessa (4 hirsitaloa ja 1 kevytbetonitalo) oli koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä.



Kuva 2.1.1 Koekohteiden valmistumisvuodet.



Kuva 2.1.2 Asukkaiden lukumäärä koekohteissa.

2.1.3 Kerrostaloasunnot

Mitattujen kerrostaloasuntojen perustiedot on koottu taulukkoon liitteessä 2. Kaiken kaikkiaan tutkimuksessa oli mukana asuntoja 16 kerrostalosta. Jokaisesta kerrostalosta oli tutkimuksessa mukana 2–5 asuntoa ja asuntojen yhteismäärä oli 56. Asunnot pyrittiin valitsemaan siten, että joku asunnoista oli talon alakerroksessa, joku yläkerroksessa ja muut asunnot välikerroksissa. Viidessä betonielementtirakenteisessa kerrostalossa tutkittiin yhteensä 17 asuntoa. Seitsemässä kerrostalossa, joissa oli paikalla valettu betoninen välipohjalaatta, tutkittiin yhteensä 23 asuntoa. Pääosassa näistä kohteista oli betonielementeistä tehdyt ulkoseinät. Yhdessä kerrostalossa (asunnot nro 6201–6203) ei-kantavat ulkoseinät olivat puurunkoiset. Neljässä puukerrostalokohteessa mitattiin yhteensä 16 asuntoa.

Kerrostaloista suurin osa oli rakennettu 2000-luvulla, puukerrostaloista kaksi oli rakennettu 1990-luvulla (v. 1997 ja 1999). Mittauksia aloitettaessa kerrostalojen keskiarvoikä oli 2,3 vuotta ja mediaani 1 vuosi. Suurimmassa osassa kohteista oli koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä; 20 asunnossa (6 kerrostaloa) oli huoneistokohtainen tulo-poistoilmanvaihto ja 12 asunnossa (4 kerrostaloa) oli keskitetty koneellinen tulo-

poistoilmanvaihto. Lopuissa 24 asunnossa (6 kerrostaloa) oli koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä. Keskimäärin asunnossa asui 1,8 asukasta.

2.1.4 Vertailu aiempaan tutkimukseen

Tämän tutkimusraportin useassa kappaleessa viitataan aiempaan tutkimushankkeeseen, jonka tulokset Vinha et al. (2005) ovat raportoineet. Lämpökamerakuvauksissa, painesuhteiden mittaauksessa ja vuotoilmanvaihdon mallinnuksessa on myös tutkittu kyseisen tutkimuksen koekohteita tai hyödynnetty tutkimushankkeessa saatuja mittaustuloksia. Aiemmassa tutkimushankkeessa tutkittiin 100 puurunkoista pientaloa v. 2002–2004. Kohteissa tehtiin samat kenttämittaukset kuin nyt kyseessä olevassa tutkimuksessa samoin menetelmin ja pääosin samalla tutkijajoukolla. Näiden kahden tutkimuksen tulosten vertailukelpoisuudesta on silti otettava huomioon muutamia asioita.

Pientalokohteiden valintaperusteet poikkesivat jonkin verran toisistaan. 100 puurunkoisen pientalon joukkoon pyrittiin valitsemaan uudehkoja pientaloja ja riittäviä aliryhmiä rakennusten seinärakenteen (vesihöyryä läpäisevä ja vesihöyrytiivis) ja ilmanvaihtotyypin osalta. Puurunkoisista kohteista n. 10 %:ssa oli painovoimainen ilmanvaihto, n. 30 %:ssa koneellinen poistoilmanvaihto ja n. 60 %:ssa koneellinen tulo-poistoilmanvaihto. Tässä tutkimuksessa kaikissa kohteissa oli koneellinen ilmanvaihto, joista suurin osa oli koneellisia tulo-poistoilmanvaihtoja. Tässä tutkimuksessa hirsitalojen osalta pyrittiin tutkimukseen valitsemaan taloja, joissa oli käytetty ilmanläpäisevyysominaisuuksiltaan vaihtelevia saumaeristeitä ja kivitaloista pyrittiin mukaan valitsemaan myös kohteita, joissa oli kivirunkoinen yläpohja. Puurunkoisten pientalojen keski-ikä mittausten aloitushetkellä oli hieman suurempi (5 vuotta) kuin tämän tutkimuksen kohteilla (3 vuotta). Puurunkoisten talojen joukossa oli muutama vanhempi 1980-luvun alussa rakennettu painovoimaisen ilmanvaihdon talo. Tämän tutkimuksen hirsi- ja kivitalojen vanhimmat pientalot olivat 10 v. vanhoja eli valmistuneet v. 1996 tai sen jälkeen. On myös otettava huomioon, että tässä tutkimuksessa talotyyppien otokset (10/ 20 taloa) olivat melko pieniä verrattuna aiemman tutkimuksen 100 puurunkoisen pientalon ryhmään. Toisaalta kivirakenteisten pientalojen otos (yhteensä 50 kpl) oli suuri.

Puurunkoiset pientalot mitattiin v. 2002–2004, kun nyt kyseessä olevat kohteet mitattiin v. 2005–2007. Eri mittausajankohta vaikuttaa mm. sisäilman olosuhteisiin, sillä puurunkoisten talojen mittausajankohdan kesäkaudet olivat keskimäärin lämpimämpiä kuin tämän tutkimuksen kesäkaudet. Myös asukaskyselyn tuloksiin vaikuttaa jossakin määrin kyselyn tekohetken ajankohta. Toisaalta, sama ongelma toistuu myös molemmissa tutkimuksissa itsessään, sillä jokainen asukaskysely on tehty eri aikaan joko loppukeväänä, kesällä tai alkusyksynä.

2.2 Ilmanpitävyyden painekokeet

2.2.1 Tutkitut kohteet

Kaikkien tutkimuksessa mukana olleiden kohteiden ilmanpitävyys mitattiin painekoemenetelmällä. Lisäksi painekokeita tehtiin yhdessä v. 2007 valmistuneessa betonielementtirakenteisessa kerrostalokohteessa, josta mitattiin asunnot 4301 (1. krs 58 m²), 4302 (2. krs 58 m²) ja 4303 (2. krs 76 m²).

Tutkimuksessa mitattiin myös yhden betonielementtirakenteisen 1-rappuisen kerrostalon (kohde 7300) koko ilmanpitävyys painekoemenetelmällä. Kohteen sisätilavuus oli 4000 m³.

2.2.2 Mittausmenetelmä

Rakennusten ja asuntojen ilmanpitävyys mitattiin ns. painekokeella, jota on kuvattu tarkemmin esimerkiksi Suomessakin vahvistetussa eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 13829 (2000). Ennen varsinaisen painekokeen aloittamista suljettiin asunnon ikkunat ja ovet sekä suljettiin ja tiivistettiin muut tarkoituksellisesti tehdyt aukot kuten ilmanvaihtoventtiilit, liesituulettimet, takan pellit ja luukut sekä korvausilmaventtiilit. Mitattavan alueen sisällä väliovet avattiin. Pientalojen sisätilavuuteen laskettiin mukaan väliseinät, mutta ei välipohjia. Kerrostalohuoneistojen sisätilavuus laskettiin kertomalla huoneistoala asunnon keskimääräisellä huonekorkeudella.

Painekoemittauksessa käytettiin kuvassa 2.2.1 esitettyä The Energy Conservatory:n valmistamaa painekoelaitteistoa (Minneapolis Blower Door) ja laitteen mukana toimitettua ohjelmistoa (TECTITE). Mittaus suoritettiin asettamalla yhteen asunnon ulko-ovista ovipuhallinsysteemi, joka koostuu ovikehyksestä ja sen ympärille pingotettavasta kankaasta, jossa on aukko puhaltimen kiinnittämistä varten. Kerrostaloasunnoissa laitteisto laitettiin asunnon ja rappukäytävän väliseen oveen, mutta paine-eroa mitattiin sisä- ja ulkoilman välillä. Paine-ero suoritettiin tietokoneohjattuna. Ohjelmaan syötettiin tiedot mm. lämpötilaolosuhteista ja rakennuksen koosta, joiden avulla ohjelma korjaa ilmavirtaukset ja ilmoittaa suoraan tulokset. Ilmavirtaukset mitattiin sarjassa vähintään viidellä eri paine-erolla (10–60 Pa). Puhaltimen läpi kulkevaa ilmavirtausta voitiin säädellä puhaltimen kierrosluvun ja erikokoisten rajoitinrenkaiden avulla portaattomasti. Jokaisella paine-eroasetuksella ohjelmisto laskee keskiarvon sadasta lyhyessä ajassa otetusta mittaustuloksesta. Ennen puhaltimen käynnistämistä, samoin kuin kokeen lopussa, laitteisto mittaa paine-eron rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä normaaleissa paineolosuhteissa.



Kuva 2.2.1 Painekoelaitteisto asennettuna asunnon oveen kerrostalossa.

Painekokeen tuloksena saadaan sarja paine-eroja ja näiden tuottamiseen tarvittavia ilmavirtauksia. Näille pisteille ohjelma sovittaa lineaarisen regression avulla kaavan 2.2.1 mukaisen käyrän.

$$\dot{V} = C \cdot \Delta P^n \quad (2.2.1)$$

missä

\dot{V} ilman tilavuusvirta [m^3/h]

C kerroin (flow coefficient) [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa})^n$]

ΔP paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä [Pa]

n eksponentti (riippuu virtaustyypistä, vaihtelee 0,5 (laminaarinen) – 1,0 (turbulenttinen))

Kaavan 2.2.1 mukaiselta käyrältä voidaan 50 Pa kohdalta lukea ilmavirtaus (\dot{V}_{50}), jota tavanomaisesti käytetään painekokeiden tulosten ilmoittamisessa. Ilmavuotoluku n_{50} voidaan laskea kaavan 2.2.2 mukaan. Ilmavuotoluku n_{50} ilmoittaa, kuinka monta kertaa rakennuksen tilavuuden suuruinen ilmamäärä vaihtuu tunnissa, kun paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä on 50 Pa.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (2.2.2)$$

missä

n_{50} rakennuksen ilmavuotoluku 50 Pa paine-erolla [1/h]

\dot{V}_{50} painekokeella mitattu ilmavirtaus 50 Pa paine-erolla [m^3/h]

V rakennuksen / mitattavan osan sisätilavuus [m^3]

Mitattu ilmavirtaus voidaan normalisoida myös rakennuksen vaipan alan (ulkoseinät, ylä- ja alapohja) suhteen. Näin saadaan suure q_{50} , joka on etenkin Euroopassa yleistynyt painekokeiden tulosten ilmoittamisessa n_{50} -luvun sijaan. (kaava 2.2.3)

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_v} \quad (2.2.3)$$

missä

q_{50} ilmanläpäisyyluku 50 Pa paine-erolla [$\text{m}^3/(\text{hm}^2)$], myös joskus [$\text{l}/(\text{sm}^2)$]
 A_v rakennuksen / mitattavan osan ulkovaipan ala [m^2]

Tässä tutkimuksessa vertailu eri talojen välillä on pääosin tehty n_{50} -luvun avulla. Ilmoitetut massiivirakenteisten talojen tulokset ovat ali- ja ylipainekokeen keskiarvotuloksia. Kerrostaloasuntojen tulokset ovat alipainekokeen tuloksia. Yli- ja alipainekokeiden tulokset erosivat kohteittain toisistaan. Keskimäärin 70 pientalon ylipainekokeiden tulokset olivat 4,5 % suurempia kuin alipainekokeiden tulokset. Standardi SFS-EN 13829 (2000) arvioi painekokeen lopullisen tuloksen tarkkuuden olevan tyynissä oloissa useimmiten alle $\pm 15 \%$ ja Ruotsissa aiemmin käytössä ollut standardi (SS 02 15 51, 1987) $\pm 10 \%$. Tässä raportissa tulokset ilmoitetaan desimaalin tarkkuudella.

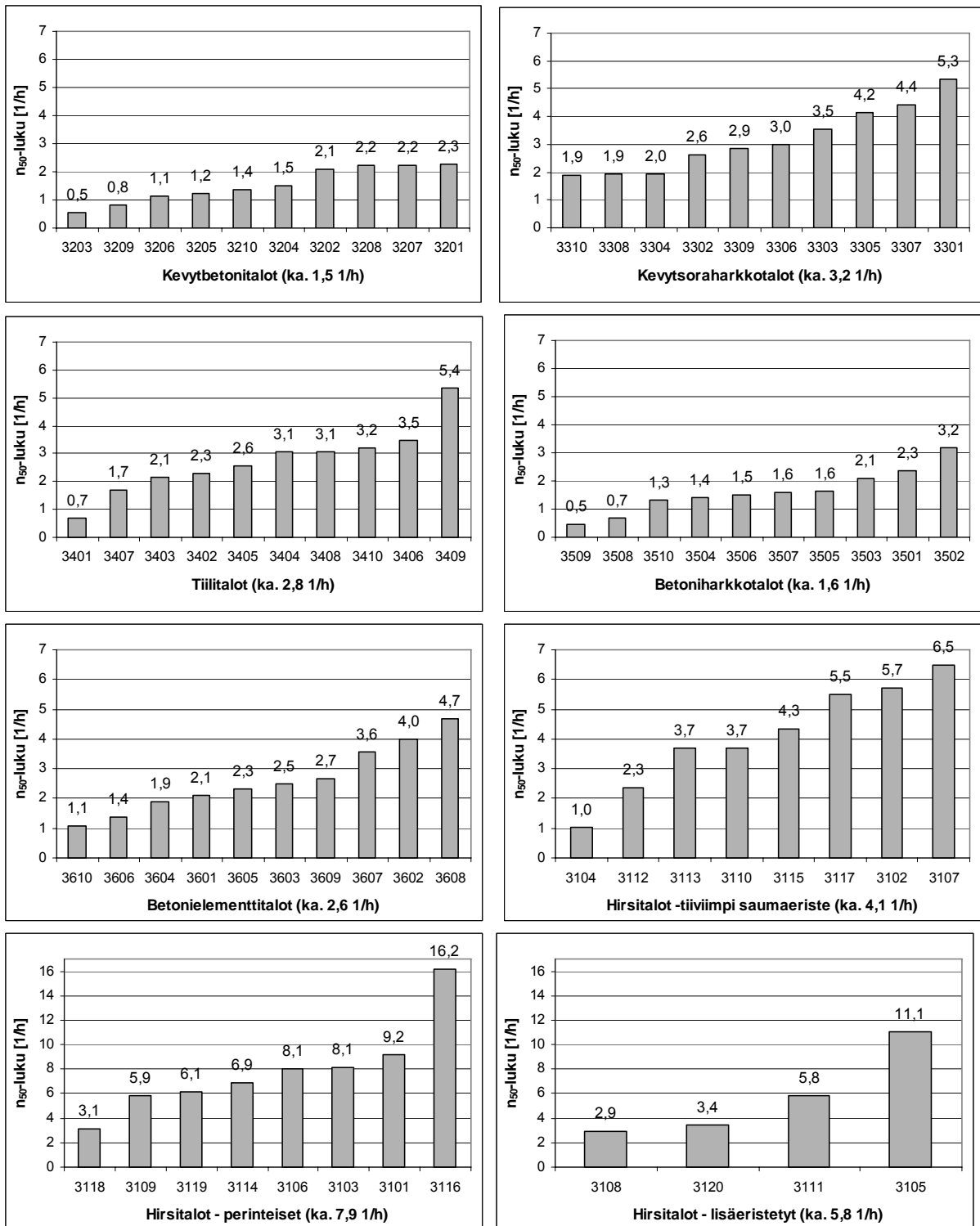
Koko kerrostalorapun ilmanpitävyys mitattiin kahdella vaihtoehtoisella tavalla: painekoelaitteistolla ja kohteen omalla ilmanvaihtolaitteella. Ennen koetta kohteen ilmanvaihtokone suljettiin keskitetysti ja asuntojen postiluukut rappukäytävään avattiin. Lisäksi rakennuksen katolla olevat hissikuilun poistopuhallin ja korvausilmaventtiili suljettiin.

Painekoelaitteisto asennettiin kellarikerroksessa sijaitsevan rappukäytävän ja ulko-oven väliseen oviaukkoon. Rakennuksen omalla ilmanvaihtolaitteella koe suoritettiin sulkemalla tuloilman pääsy rakennukseen koneella ja säätämällä poistoilmavirtaa. Poistopuhaltimen ilmavirtausmäärät saatiin poistoilmapuhaltimesta mitattujen paine-erojen avulla. Vuotoilman virtaussuunta oli täten kokeen aikana rapusta asuntoihin ja poistokanavien kautta ilmanvaihtoventtiilille. Ilmanvaihtokoneella saatu suurin paine-ero sisä- ja ulkoilman välille (kellarikerroksesta mitattuna) oli n. 25 Pa. Mitattuja paine-eroja vastaaviin virtaustuloksiin sovitettiin kaavan 2.2.1 mukainen käyrä, jonka avulla saatiin n_{50} -luku.

2.2.3 Tulokset ja niiden tarkastelu

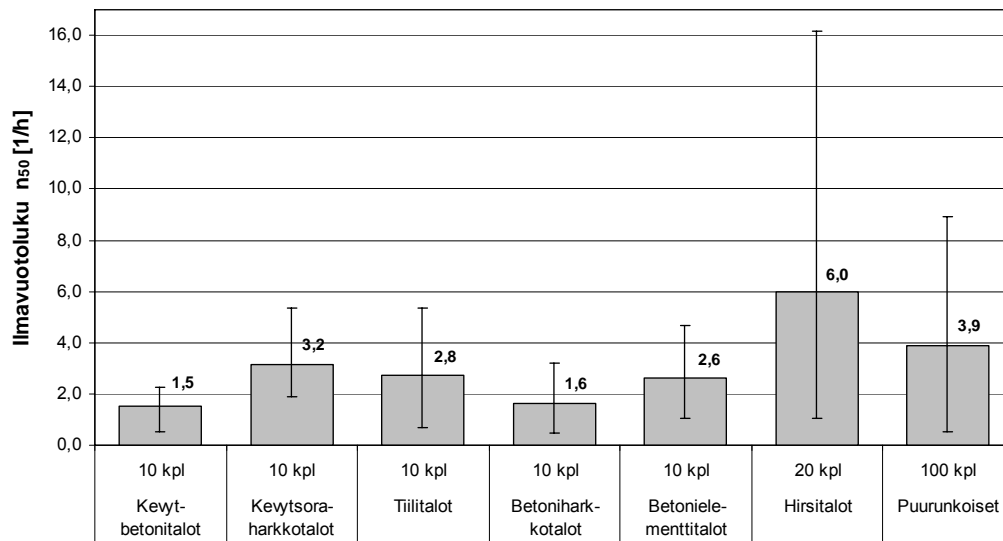
2.2.3.1 Pientalot

Mitattujen pientalojen ilmavuotoluvut n_{50} talotyypeittäin on esitetty kuvassa 2.2.2. Vastaavat ilmanläpäisyluvut q_{50} on esitetty liitteessä 5. Massiivirunkoiset hirsitalot (16 taloa) on jaettu kahteen ryhmään niissä käytettyjen saumaeristeiden ja saumaeristeiden oletetun ilmanpitävyyden perusteella. Perinteisten hirsitalojen ryhmässä hirsien saumaeriste oli mineraalivillaa, pellavaa tai polypropeenaa. Talo laskettiin tiiviimpien saumaeristeisten talojen ryhmään, mikäli hirsikertojen välissä joko seinällä tai nurkissa oli käytetty esim. solukumia tai paisuvaa saumaeristettä. Hirsitalot, joissa oli käytetty tiiviimpiä saumaeristeitä olivat keskimääriin ilmanpitävämpiä kuin perinteiset hirsitalot. Osassa näistä hirsitaloista (3104, 3113 ja 3115) yläpohja oli polyuretaanieristeinen. Tämä mahdollisesti osaltaan selittää näiden hirsitalojen hyvää ilmanpitävyyttä. Hirsitalo 3108 oli eristetty ulkopuolelta, muut lisäeristetyt hirsitalot olivat sisäpuolelta lisäeristettyjä.

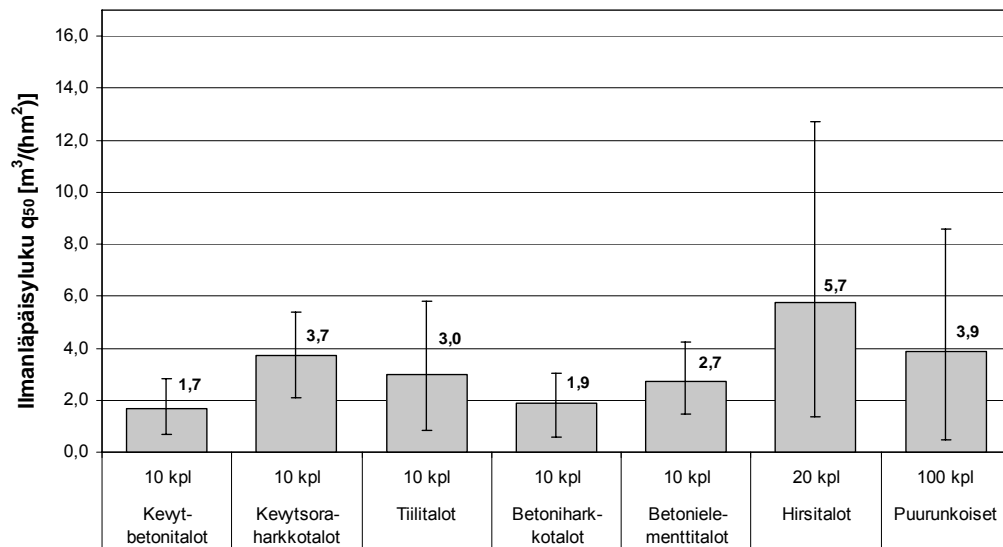


Kuva 2.2.2 Pientalojen ilmapuotoluvut on esitetty talotyypeittäin. Nelinumeroinen luku on talon koodi. Kahdessa alimman rivin kuvassa mitta-asteikko on erilainen kuin muissa kuvissa.

Kuvissa 2.2.3 ja 2.2.4 on esitetty yhteenveto pientalojen mittaustuloksista. Puurunkoisten pientalojen ilmanpitävyytulokset on saatu aiemmin tehdyssä tutkimuksessa (Vinha et al. 2005). Kivitalojen ilmanpitävyys (2,3 1/h) oli keskimäärin puurunkoisia taloja (3,9 1/h) ja hirsitaloja (6,0 1/h) parempi. Vertailu eri talotyyppien välillä on tehty sekä n_{50} -luvulla (kuva 2.2.3) että vaipan pinta-alan suhteen normeeratulla q_{50} -luvulla (kuva 2.2.4).



Kuva 2.2.3 Pientalojen painekoetulokset rakennuksen sisätilavuuteen (n_{50} -luku) normalisoituna. Keskiarvot ja tulosten vaihteluväli.



Kuva 2.2.4 Pientalojen painekoetulokset vaipan pinta-alaan (q_{50} -luku) normalisoituna. Keskiarvot ja tulosten vaihteluväli.

Kuvista huomataan, että talotyyppien (kivi vs. hirsi ja puu) väliset erot hieman tasoittuvat, kun niitä vertaillaan ilmanläpäisyluvun (q_{50} -luku = ilmavirtaus/vaipan ala) avulla. Tämä johtuu siitä, että kivitalojen tilavuus suhteessa vaipan alaan oli keskimäärin suurempi kuin hirsi- ja puutalojen. Teoriassa esim. kuution muotoinen talo täyttää suhteessa paremmin n_{50} -luvulle asetetun vaatimuksen kuin q_{50} -luvulle asetetun vaatimuksen monimuotoisempaan taloon verrattuna. Sama ilmiö selittää sitä, että useampikerroksiset kivitalot olivat merkittävästi tiiviimpiä kuin yksikerroksiset, kun taloja verrattiin n_{50} -luvun avulla. Ero ei ollut merkittävä q_{50} -luvun avulla tehdyssä vertailussa (ks. taulukko 2.2.4). Mitatut kivitalot olivat sisätilavuudeltaan (ka. $554 m^3$) myös keskimäärin suurempia kuin hirsitalot (ka. $483 m^3$) tai puutalot (ka. $405 m^3$). Kivi- ja hirsitaloissa ilmavuotoluvun n_{50} ja tilavuuden välillä

havaittiin heikko korrelaatio: tilavuudeltaan isompien talojen ilmavuotoluvut olivat hieman pienempiä. Puutalojen ryhmässä tilavuudella ei havaittu olevan vaikutusta ilmavuotolukuun.

Kuvista 2.2.3 ja 2.2.4 nähdään myös hyvin, että kaikilla talotyypeillä on tuloksissa hajontaa, ja että kaikkien talotyyppien tiiveimmissä kohteissa on saavutettu varsin hyvä ilmanpitävyys.

Tutkimuksessa verrattiin myös eri rakenteellisten tekijöiden vaikutusta pientalojen ilmavuotolukuun. Kivi- ja puurakenteisilla yläpohjilla toteutettujen kivitalojen ilmavuotolukuja on verrattu taulukossa 2.2.1. Vertailuun on otettu mukaan ne talotyypit, joissa esiintyi kumpiakkin yläpohjaratkaisuja. Tulosten perusteella yläpohjan rakenneratkaisuilla oli vaikutusta kivirakenteisten pientalojen ilmanpitävyyteen. Keskimäärin ilmavuotoluvut olivat kiviyläpohjaisissa taloissa pienempiä kuin puurunkoyläpohjaisissa taloissa, joskin on otettava huomioon, että vertailtavien talotyyppien sisällä talomäärät olivat pieniä. Tarkasteluun valitussa kokonaisotoksessa puu- ja kiviyläpohjaisten talojen n_{50} - ja q_{50} -lukujen ero oli tilastollisesti merkitsevä (t-testi, n_{50} : $p < 0,01$, q_{50} : $p < 0,05$). Myös tutkimuksessa tehtyjen lämpökamerakuvausten perusteella yläpohjan ja ulkoseinän liitospaikka on yleisin ilmavuotokohta (ks. luku 2.3.4). Massiivirakenteisen ulkoseinän ja puurunkoisen yläpohjan välisen liitoksen tiivistämiseen tuleekin kiinnittää erityisesti huomiota (Aho & Korpi (toim.) 2009).

Taulukko 2.2.1 Kivi- ja puurakenteisella yläpohjalla toteutettujen kivirakenteisten pientalojen ilmavuoto- ja ilmanläpäisyluvut.

Talotyyppi	Talot, joissa kivirakenteinen yläpohja			Talot, joissa puurakenteinen yläpohja		
	Talojen lkm	ka. n_{50} -luku [1/h]	ka. q_{50} -luku [m^3/hm^2]	Talojen lkm	ka. n_{50} -luku [1/h]	ka. q_{50} -luku [m^3/hm^2]
Kevytbetonitalot	9	1,5	1,6	1	2,3	2,0
Kevytsoraharkkotalot	1	1,9	2,4	9	3,3	3,8
Betoniharkkotalot	3	1,2	1,6	7	1,8	2,0
Betonielementitalot	2	1,2	1,6	8	3,0	3,0
Yhteensä	15	1,6	1,8	25	2,7	2,9

Taulukossa 2.2.2 on verrattu maanvastaisella betonilaatalla ja kivirakenteisella ryömintätalalaisella alapohjalla toteutettujen kivirakenteisten pientalojen ilmavuotolukuja keskenään. Vertailuun on otettu mukaan ne talotyypit, joissa esiintyi molempia alapohjaratkaisuja. Taulukosta nähdään, että erilaiset kivirakenteiset alapohjaratkaisut eivät vaikuttaneet merkittävästi rakennusten ilmavuotolukuun, kun tarkastellaan koko otoksen keskiarvoja. Talotyyppikohtaiset vaihtelut olivat suuria, mutta niissä otokset olivat tässäkin tapauksessa pieniä.

Taulukko 2.2.2 Maanvastaisella betonilaatalla ja ryömintätillaisella alapohjalla toteutettujen kivirakenteisten pientalojen ilmavuoto- ja ilmanläpäisyluvut.

Talotyyppi	Talot, joissa maanvastainen betonilaatta			Talot, joissa kivirakenteinen ryömintätillainen alapohja		
	Talojen lkm	ka. n ₅₀ -luku [1/h]	ka. q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]	Talojen lkm	ka. n ₅₀ -luku [1/h]	ka. q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]
Kevytbetonitalot	6	1,5	1,7	4	1,7	1,7
Kevytsoharkkotalot	9	3,1	3,6	1	4,2	4,3
Betonielementtitalot	6	2,2	2,5	4	3,2	3,2
Yhteensä	21	2,4	2,7	9	2,6	2,6

Eri alapohjaratkaisujen vaikutusta rakennuksen ilmanpitävyyteen tarkasteltiin lisäksi aiemmin mitattujen puurunkoisten pientalojen osalta (taulukko 2.2.3). Tähän vertailuun on otettu mukaan myös puurakenteiset ryömintätillaiset alapohjat. Polyuretaanieristeiset talot (6 kpl) jätettiin vertailusta pois, koska ne olivat keskimäärin selvästi muita tiiviimpiä (Vinha et al. 2005) ja kaikkien niiden alapohjaratkaisuna oli käytetty maanvastaista betonilaattaa. Ne talot, joiden alapohjarakenteina oli käytetty kahta eri toteutusratkaisua (6 kpl), lisättiin mukaan kumpaankin ko. ratkaisulla tehtyjen rakennusten ryhmään. Tässäkään vertailussa ryömintätillaisen kivirakenteisen alapohjan käyttö ei lisännyt rakennuksen ilmavuotolukua merkittävästi maanvastaisella laatalla toteutettuihin rakennuksiin verrattuna. Puurakenteisen ryömintätillaisen alapohjan käyttö näytti lisäävän hieman ilmavuotolukua maanvastaiseen betonilaataan verrattuna, mutta tämäkään ero ei ollut tilastollisesti merkittävä. Ilmanläpäisyluvussa q₅₀ eroja ei ollut käytännössä lainkaan eri alapohjaratkaisujen välillä.

Taulukko 2.2.3 Maanvastaisella betonilaatalla ja ryömintätillaisella alapohjalla toteutettujen puurunkoisten pientalojen ilmavuoto- ja ilmanläpäisyluvut. Tarkastelusta on jätetty pois polyuretaanieristeiset talot, koska ne olivat keskimäärin huomattavasti ilmanpitävämpiä kuin ilmansulkukalvolla toteutetut talot.

Talotyyppi	Talot, joissa maanvastainen betonilaatta			Talot, joissa kivirakenteinen ryömintätillainen alapohja			Talot, joissa puurakenteinen ryömintätillainen alapohja		
	Talojen lkm	ka. n ₅₀ -luku [1/h]	ka. q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]	Talojen lkm	ka. n ₅₀ -luku [1/h]	ka. q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]	Talojen lkm	ka. n ₅₀ -luku [1/h]	ka. q ₅₀ -luku [m ³ /hm ²]
Puurunkoiset talot	69/ 68 ⁽¹⁾	4,0	4,2	13	4,2	4,3	18	4,4	4,3

¹⁾ Yhdestä puurunkoisesta talosta vaipan pinta-alaa ei määritetty, joten q₅₀-luku on laskettu pienemmällä kohteiden lukumäärällä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös kerrosten lukumäärän/ välipohjan vaikutusta pientalojen ilmanpitävyyteen. Taulukossa 2.2.4 pientalot on jaettu yksikerroksisiin ja useampikerroksisiin taloihin. Jälkimmäiseen ryhmään kuuluivat kaikki 1½-kerroksiset ja sitä suuremmat talot. Taulukkoon on otettu mukaan myös aiemmassa tutkimuksessa (Vinha et al. 2005) mitatut puurunkoiset talot. Puurunkoisten pientalojen ryhmästä on tässäkin tapauksessa jätetty pois polyuretaanieristeiset talot (6 kpl), koska ne olivat keskimäärin selvästi muita tiiviimpiä ja kaikki talot yhtä lukuun ottamatta kuuluivat useampikerroksisten talojen ryhmään.

Taulukko 2.2.4 Yksi- ja useampikerroksisten pientalojen ilmavuoto- ja ilmanläpäisyluvut. Puurunkoisten talojen tarkastelusta on jätetty pois polyuretaanieristeiset talot, koska ne olivat keskimäärin huomattavasti ilmanpitävämpiä kuin ilmansulkukalvolla toteutetut talot.

Talotyyppi	Talot, joissa yksi kerros			Talot, joissa useita kerroksia		
	Talojen lkm	ka. n_{50} -luku [1/h]	ka. q_{50} -luku [m^3/hm^2]	Talojen lkm	ka. n_{50} -luku [1/h]	ka. q_{50} -luku [m^3/hm^2]
Kevytbetonitalot	3	2,0	1,8	7	1,3	1,6
Kevytsoraharkkotalot	2	4,4	4,6	8	2,9	3,5
Tiilitalot	4	2,7	2,5	6	2,8	3,2
Betoniharkkotalot	2	2,4	2,2	8	1,4	1,8
Betonielementtitalot	4	3,3	2,9	6	2,2	2,6
Kivitalot yhteensä	15	2,9	2,7	35	2,1	2,5
Hirsitalot	8/ 7 ⁽¹⁾	7,3	6,0	12	5,1	5,6
Puurunkoiset talot	46	3,8	3,4	48/ 47 ⁽¹⁾	4,4	4,8

¹⁾ Yhdestä hirsitalosta ja yhdestä puurunkoisesta talosta vaipan pinta-alaa ei määritetty, joten q_{50} -luku on laskettu pienemmällä kohteiden lukumäärällä.

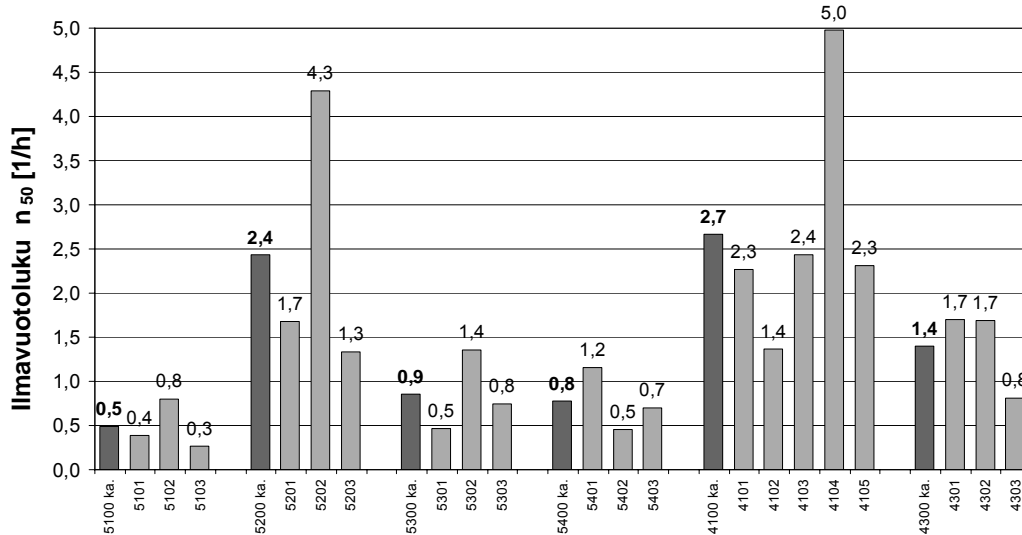
Taulukon 2.2.4 perusteella voidaan todeta, että kerrosten lukumäärä vaikutti pientalojen ilmavuotolukuun kaikissa talotyypeissä (kivi- hirsi- ja puurunkotalot) vaikkakaan erot eivät olleet kaikilta osin tilastollisesti merkitseviä. Kivi- ja hirsirakenteisilla pientaloilla keskimääräinen ilmavuotoluku n_{50} pieneni, kun rakennus muuttui useampikerroksiseksi. Kivitaloilla ero oli myös tilastollisesti merkitsevä (t-testi, $p < 0,05$). Puurunkoisilla pientaloilla vaikutus oli päinvastainen. Syynä tulosten erilaisuuteen on se, että kivi- ja hirsitaloissa välipohjan liitos ulkoseinään ei heikentänyt talojen ilmanpitävyyttä merkittävästi suhteessa ko. talotyyppin tyypilliseen ilmanpitävyyteen. Talojen sisätilavuus sen sijaan kasvoi suhteessa ulkovaipan pinta-alaan, joka pienensi ilmavuotolukua (ks. kaavat 2.2.2 ja 2.2.3). Tämä nähdään talojen q_{50} -luvuista, jotka eivät pienentyneet yhtä paljon kuin ilmavuotoluvut. q_{50} -lukuja vertailtaessa kerrosten lukumäärällä ei ollut myöskään tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kivi- ja hirsitalojen ilmanpitävyyteen.

Puurunkoisissa taloissa välipohjan ja ulkoseinän liitoksella oli niin merkittävä ilmavuotolukua heikentävä vaikutus, että rakennusten keskimääräinen ilmavuotoluku kasvoi, vaikka rakennusten sisätalavuuskin kasvoi. Tarkasteltaessa n_{50} -lukuja ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä, mutta q_{50} -lukuja tarkasteltaessa se oli hyvin merkitsevä (t-testi, $p < 0,001$). Tulos tukee myös käytännön kokemuksia, sillä puurunkoisissa taloissa välipohjan ja ulkoseinän liitoskohdan tiivistäminen vaatii huolellisuutta ja oikeanlaisia toteutustapoja varsinkin niillä seinillä, joihin välipohjajavasat tukeutuvat (Aho & Korpi (toim.) 2009).

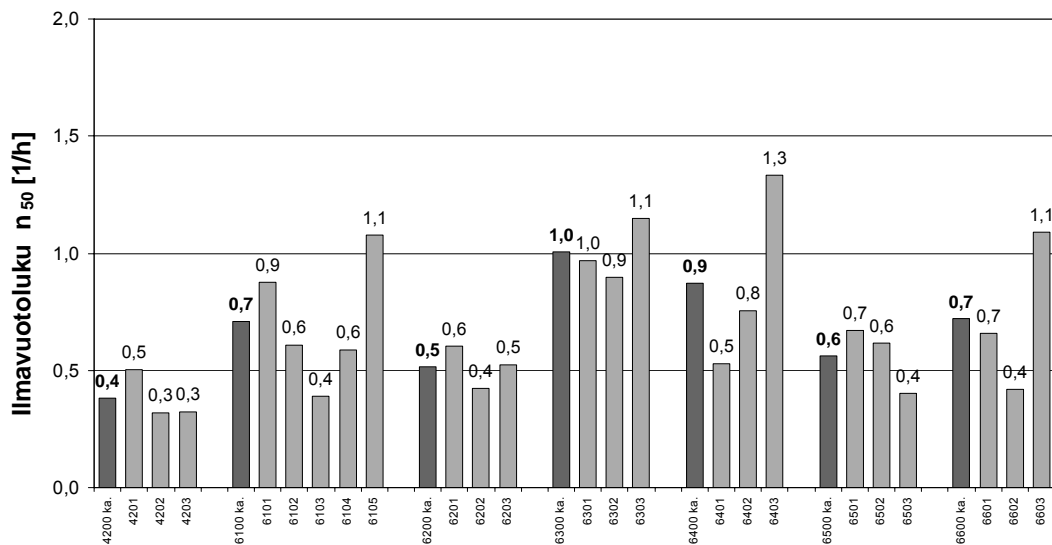
2.2.3.2 Kerrostaloasunnot

Kerrostaloasuntojen ilmavuotoluvut olivat keskimäärin pienempiä kuin pientalojen. Keskimääräisen asunnon ilmavuotoluku n_{50} oli 1,6 1/h ja tulosten vaihteluväli 0,3–5,3 1/h. Asuntojen keskimääräinen koko oli 72 m^2 ja vaihteluväli 35–138 m^2 . 49 % kohteista ilmavuotoluku oli alle 1/h.

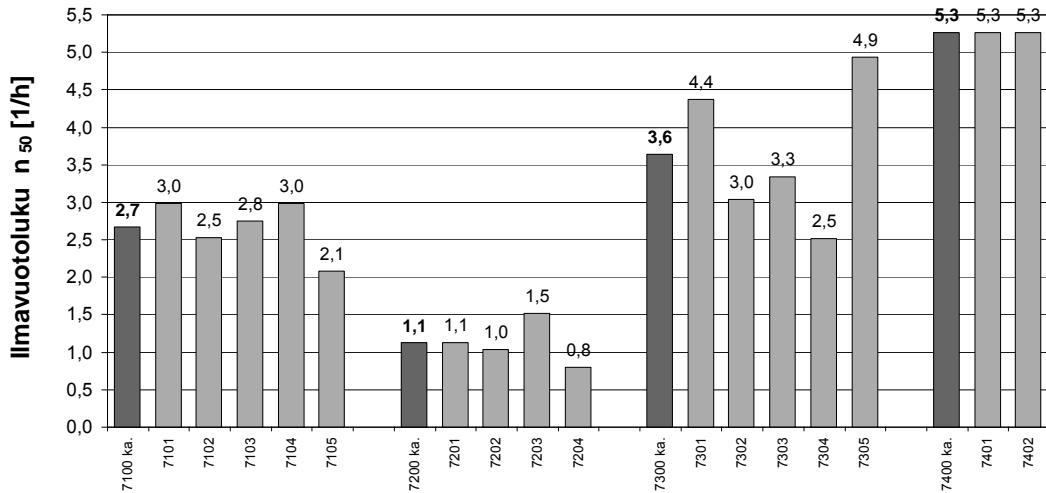
Ilmanpitävyyden jakauma kerrostalotyypeittäin on esitetty kuvissa 2.2.5–2.2.7. Keskimäärin pienimmät ilmanpitävyytulokset (0,7 1/h) saatiin kerrostaloasunnoissa, joissa oli paikalla valettu välipohja. Betonielementtitaloasuntojen ilmavuotoluvun keskiarvo oli 1,6 1/h ja puukerrostaloasuntojen 2,6 1/h.



Kuva 2.2.5 Betonielementtirakenteisten kerrostaloasuntojen ilmavuotoluvut. Tummennettu pylväs kuvaa saman talon asuntojen keskiarvoa.



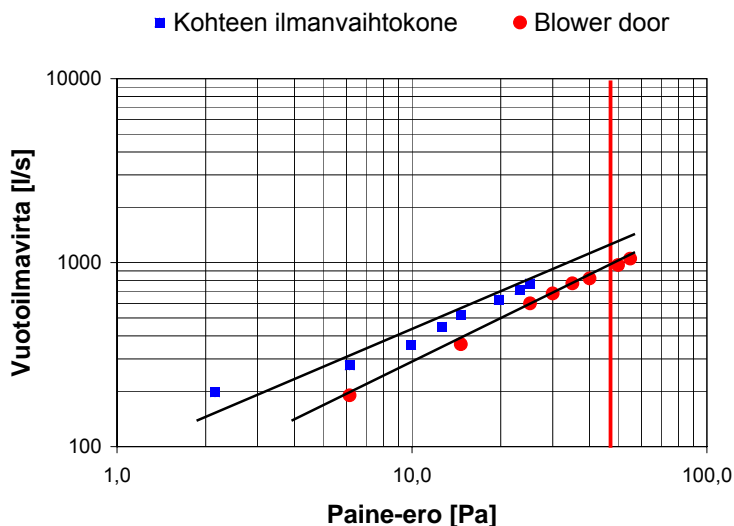
Kuva 2.2.6 Betonisten paikallavälipohjaisten kerrostaloasuntojen ilmavuotoluvut. Tummennettu pylväs kuvaa saman talon asuntojen keskiarvoa.



Kuva 2.2.7 Puurakenteisten kerrostaloasuntojen ilmavuotoluvut. Tummennettu pylväs kuvaa saman talon asuntojen keskiarvoa.

2.2.3.3 Kerrostalorappu

Koko kerrostalorapussa sekä rakennuksen omalla ilmanvaihtokoneella että painekoelaitteistolla mitatut paine-erot ja vastaavat vuotoilmavirrat on esitetty kuvassa 2.2.8. Paineekoelaitteistolla saatu ilmavuotoluku n_{50} oli 0,9 1/h ja omalla ilmanvaihtokoneella saatu tulos 1,2 1/h. Eri menetelmillä saadut tulokset eivät merkittävästi poikkea toisistaan. Rakennuksesta mitattujen kolmen asunnon n_{50} -luvut (1,3 1/h, 4,3 1/h ja 1,7 1/h) olivat suurempia kuin koko rapun ilmavuotoluku. Asuntojen ilmavuotoluvuissa näkyy mahdollinen ilmavuoto rappukäytävään, viereisiin asuntoihin jne.



Kuva 2.2.8 Kerrostalorapun vuotoilmavirtaus sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron funktiona.

2.2.4 Johtopäätökset

Tutkimuksessa mitattujen 10 kevytbetonitalon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 1,5 1/h (q_{50} : 1,7 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$), 10 kevytsoraharkkotalon 3,2 1/h (3,7 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$), 10 tiilitalon 2,8 1/h (3,0 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$), 10 betoniharkkotalon 1,6 1/h (1,9 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$), 10 betonielementtitalon 2,6 1/h (2,7 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$) ja 20 hirsitalon 6,0 1/h (5,7 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$). 20 betonielementtirakenteisen kerrostaloasunnon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 1,6 1/h. 23 kerrostaloasunnon, jossa välipohja oli paikallavalettu, n_{50} -lukujen keskiarvo oli 0,7 1/h. Puukerrostalojen 16 asunnon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 2,6 1/h. Tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että kyse ei ole täysin satunnaisesta otoksesta vaan taloja on osin valittu tarkoituksena saada erilaisia aliryhmiä (esim. kivitalojen erilaiset yläpohjarakenteet ja hirsien saumaeristemateriaalit). Yhden mitatun kerrostalorapun ilmavuotoluku painekoelaitteistolla mitattuna oli 0,9 1/h ja kohteen omalla ilmanvaihtolaitteistolla 1,2 1/h. Koko kerrostalorapun ilmavuotoluku oli pienempi kuin kohteesta mitattujen yksittäisten asuntojen. Asuntojen ilmavuotoluvussa on mukana ilmavuodot asunnon ja viereisten asuntojen sekä rappukäytävän välillä. Eri talotyyppien välisessä vertailussa on otettava huomioon, että ryhmien otokset olivat melko pienet.

Kivitalojen ilmanpitävyys (n_{50} -lukujen keskiarvo 2,3 1/h) oli keskimäärin parempi kuin hirsitalojen (6,0 1/h) ja aiemmassa tutkimuksessa (Vinha et al. 2005) mitattujen puurunkoisten talojen (3,9 1/h). Erot talotyyppien välillä tasoittuvat hieman, kun vertailu tehdään q_{50} -luvun avulla (kivitalot: 2,6 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$, hirsitalot: 5,7 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$ ja puurunkoiset talot: 3,9 $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$). Hirsitaloissa, joissa hirsien välisenä saumaeristeenä oli käytetty uudenaikaisia tiiviimpiä saumaeristeitä (solukumi- tai muovieriste), oli keskimäärin parempi ilmanpitävyys kuin hirsitaloissa, joissa oli käytetty ns. perinteisiä saumaeristeitä (mineraalivilla, pellava, polypropeeni). Joissain näissä kohteista ilmanpitävyyteen saattoi myös vaikuttaa muut tekijät kuin saumaeriste (osassa kohteista oli esimerkiksi polyuretaanieristeinen yläpohja).

Tarkasteluun valitussa kivitalojen ryhmässä kivirakenteisella yläpohjalla toteutettujen talojen ilmavuotoluvut olivat keskimäärin pienempiä kuin puurakenteisella yläpohjalla toteutettujen talojen. Maanvastaisella betonilaatalla ja kivirakenteisella ryömintätalaisella alapohjalla toteutettujen talojen ilmavuotoluvuissa ei sen sijaan havaittu merkittävää eroa. Sama tulos havaittiin myös aiemmin mitattujen puurunkoisten pientalojen kohdalla. Useampikerroksisten kivi- ja hirsirakenteisten pientalojen ilmavuotoluvut olivat pienempiä kuin vastaavien yksikerroksisten pientalojen, kun vertailussa käytettiin n_{50} -lukuja. Aiemmin mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa tilanne oli päinvastainen. Ero johtui siitä, että puurunkoisissa pientaloissa välipohjan liitos ulkoseinään heikensi rakennuksen ilmanpitävyyttä merkittävästi. Kivi- ja hirsirunkoisissa pientaloissa n_{50} -lukujen pieneneminen johtui lähinnä sisätilavuuden kasvusta, koska erot q_{50} -lukujen osalta olivat melko pieniä. Tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa, että otokset olivat joissakin tapauksissa pieniä ja mm. eri kivitalotyyppien välillä oli tuloksissa suurta vaihtelua.

Rakentamisen laadulla ja ilmanpitävyyden huomioon ottavalla suunnittelulla ja toteutuksella on suuri merkitys hyvän ilmanpitävyyden saavuttamisessa. Tähän liittyen projektin

yhteydessä on julkaistu myös raportti, jossa esitetään eri rakenneratkaisuille ja liitosdetaljeille toimivia ilmanpitäviä liitoksia (Aho & Korpi (toim.) 2009).

2.3 Lämpökamerakuvaukset

2.3.1 Johdanto

Hallitsematon vuotoilmavaihto on merkittävä energiankulutustekijä (Jokisalo et al. 2007b). Paikalliset ilmastuodot vaikuttavat olennaisesti myös ulkovaipan kosteustekniseen toimintaan (Ojanen & Kumaran 1996; Kilpeläinen et al. 2000; Kalamees & Kurnitski 2008). Lisäksi ilmastuodot voivat heikentää ilmanvaihtojärjestelmien toimintaa, lämpöviihtyisyyttä, sisäilman laatua sekä rakenteiden paloteknistä toimintaa. Ilmastuoto riippuu rakenteiden ilmanläpäisevyydestä, vuotoilmapaikkojen jakaumasta ja sisä- ja ulkoilman välisen paineeron jakaumasta.

Kylmäsiltoja, eli viereisiin verrattuna enemmän lämpöä johtavia rakenneseosia, löytyy kaikista taloista. Kylmäsiltoja voivat johtaa rakennuksen muodosta (esim. ulkovaipan nurkat, alapohjan ja seinän liittymä) tai rakenneteknisistä syistä (esim. liitokset ja läpiviennit). Sisäpinnan lämpötilan paikallista alenemista aiheuttavat myös eristysvirheet, eristepuutteet, kastuneet rakenteet, puutteet ilmansuluissa sekä lämmitys- ja ilmastuvaihtojärjestelmien toiminta. Kylmässä ilmastossa kylmäsiltojen arviointi on tärkeää monesta syystä. Kylmäsiltojen suuremmasta lämmönjohtavuudesta johtuva matalampi sisäpinnan lämpötila ja tästä johtuva korkeampi ilman suhteellinen kosteus voi johtaa sisäpinnan homeutumiseen tai pintakondenssiin. Vesihöyryn kondensoituminen ulkovaipan sisäpinnalle alkaa, kun pinnan lämpötila alittaa ympäröivän ilman kyllästyskosteuspitoisuuden, jolloin pinnan suhteellinen kosteus on 100 % RH. Homekasvusto aktivoituu, kun pinnan tai rakenteen suhteellinen kosteus on korkeampi, kuin 75–80 % RH. Rakennuksen ulkovaipan lämmöneristyksen parantuessa on kylmäsiltojen osuus koko talon energiankulutuksessa kasvanut. Matalat pintalämpötilat laajoilla seinäpinnoilla voivat vähentää lämpöviihtyvyyttä, ennen kaikkea vedosta ja lämpösäteilyn epäsymmetrisyydestä johtuen.

Rakennuksen lämpökuvauksesta on tullut yksi käytetyimmistä menetelmistä rakentamisen laadun ja rakenteiden lämpöteknisen toiminnan arvioimisessa. Lämpökameran avulla pystytään analysoimaan tutkittavan kohteen ominaisuuksia ja kuntoa ilman rakenteiden purkamista. Tässä projektissa on selvitetty kylmäsiltojen ja ilmastuotokehtien jakauma 21 pientalossa ja 16 kerrostaloasunnossa Helsingin ja Tampereen lähiseuduilta vuosina 2005–2007.

2.3.2 Menetelmät

2.3.2.1 Koekohteet

Koekohteet ovat valittu ”Kosteusvarma terve pientalo” (Vinha et al. 2005) (100 puurunkoista pientaloa) ja tämän projektin (56 kerrostaloasuntoa ja 70 massiivirakenteista (hirsi- ja kivirakenteista) pientaloa) tutkimusprojektien tietokannoista. Kohteet valittiin edustamaan talotyyppiään ulkovaipan ilmanpitävyyden osalta. Taulukossa 2.3.1 on esitetty koekohteiden ominaisuudet.

Taulukko 2.3.1 Tutkittujen kohteiden ominaisuudet.

Nro.	Rak. vuosi	Kerros	n ₅₀ , 1/h	IV-kerroin (käyttö)	Ulkoseinä							Alapohja		Yläpohja	
					Puu-rakenteinen	Hirsi	Kevytbetoni-harkko	Kevytsora-harkko	Tiili, tiiliharkko	Betoniharkko	Betoni-elementti	Maan-varainen	Tuuletettu	Betoni-rakenteinen	Kevytbetoni-rakenteinen
Pientalot															
1042	1994	2	3,4	0,32	X								X		X
1047	2002	2	3,5	0,37	X							X			X
2014	2000	2	3,9	0,31	X							X			X
3106	1997	1	8,1			X						X			X
3110	2006	2	3,7	0,19		X						X			X
3114	2005	2	6,9	0,31		X						X			X
3202	2001	2	2,1	0,38			X						X		X
3204	2000	1	1,5	0,47			X						X		X
3205	1999	2	1,2	0,29			X					X			X
3302	2004	4	3	0,35				X				X			X
3303	2005	1	3,5	0,29				X				X			X
3305	2004	2	4,2	0,46				X					X		X
3402	1997	2	2,3	0,3					X			X			X
3405	1997	1	2,4	0,19					X			X			X
3406	2005	2	3,5	0,45					X			X			X
3503	2003	2	1,9	0,5						X		X			X
3505	2004	1	1,6	0,46						X		X			X
3508	2003	1	0,7	0,47						X		X	X		X
3602	2004	1	4,1	0,24							X	X			X
3603	2003	1	2,5	0,73								X	X		X
3609	1999	2	2,7	0,48								X	X		X
Kerrostalot															
5201	2000	5/7	1,9	0,60							X	X		X	
5202	2000	4/7	4,5	0,61							X	X		X	
5203	2000	1/7	1	0,68							X	X		X	
6601	2006	4/4	0,8	0,50							X	X		X	
6602	2006	2/4	0,4	0,50							X	X		X	
6603	2006	1/4	1,1	0,49							X	X		X	
7101	2006	4/4	3,2	0,48	X										X
7102	2006	4/4	2,9	0,75	X										X
7103	2006	3/4	2,9	0,52	X										X
7104	2006	3/4	3,2	0,33	X										X
7105	2006	2/4	2,2	0,49	X										X
7301	1996	5/5	4,8		X										X
7302	1996	4/5	3,3		X										X
7303	1996	3/5	3,8		X										X
7304	1996	2/5	2,9		X										X
7305	1996	1/5	5,5							X				X	

2.3.3 Mittausmenetelmät

Kylmäsiltojen ja vuotopaikkojen sijainti määritettiin lämpökamerakuvausten (ThermaCam P65) perusteella talvella. Lämpökamerakuvaus tehtiin talon sisäpuolelta aluksi talon normaaleissa paineolosuhteissa. Näin saatiin selville kylmäsiltojen paikat ja ilmavuotojen vaikutus talon normaaliolosuhteissa. Ilmavuotojen löytämiseksi asunnossa pidettiin 50 Pa alipaine ulkoilmaan nähden n. 30 minuutin ajan ja samat kohdat lämpökuvattiin uudestaan.

Ennen lämpökuvausta mitattiin ulkolämpötila, sisälämpötila (jokaisesta huoneesta) ja selvitettiin tuuli- ja paine-ero-olosuhteet. Mittauksen ajaksi ilmanvaihto suljettiin teippaamalla tulo- ja poistoventtiilit tai -kanavat ilmanvaihtokoneesta. Mittausaikaa edeltävän 24 tunnin ulkoilman lämpötila selvitetiin Ilmatieteen laitoksen lähimmältä havaintoasemalta.

2.3.3.1 Mittaustulosten tulkinta

Rakennuksen ulkovaipan lämpötekniistä toimintaa voidaan arvioida lämpötilaindeksin avulla. Lämpötilaindeksi (TI), näyttää sisälämpötilan (T_i) ja ulkolämpötilan (T_e) eron suhteen sisäpinnan (T_{si}) ja ulkolämpötilan eroon:

$$TI = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \cdot 100 \quad (2.3.1)$$

Tavoitteesta riippuen, lämpötilaindeksille voidaan asettaa erilaisia raja-arvoja. Raja-arvojen suuruus riippuu toimivuuskriteereistä, rakennuksen käyttötavasta, sisä- ja ulkoilmastosta, kosteuskuormista ja rakennusmateriaaleista. Toimivuuskriteerin yleisinä vaatimuksina voidaan kuitenkin pitää pintakondenssin ja homeen kasvun välttämistä.

Asumisterveysohjeen mukaisesti seinän ja ulkovaipan liitoskohtien sekä läpivientien pistemäistä lämpötilaa kuvaava välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 61 % ja hyvän tason ≥ 65 %. Lämpötilaindeksiä 61 vastaava pistemäinen pintalämpötila on ikkunan, seinännurkkien ja läpivientien alin hyväksyttävä pistemäinen pintalämpötila, joka vastaa 9 °C pintalämpötilaa, kun ulkoilman lämpötila on -10 °C ja sisäilman lämpötila 21 °C. 9 °C on 45 % RH:ta vastaava kastepistelämpötila.

Seinän välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 81 % ja hyvän tason lämpötilaindeksi on ≥ 87 %. Vastaavasti lattian välttävän tason lämpötilaindeksi on ≥ 87 % ja hyvän tason lämpötilaindeksi on ≥ 97 %. Lämpötilaindeksi $TI > 80$ % on turvallinen taso myös asuin- ja oleskelutiloissa, missä on korkea kosteuskuorma (Kalamees 2007). Tässä tutkimuksessa on kylmäsillat jaettu eri luokkiin 5 yksikön välein seuraavasti: < 61 , $61-64$, $65-69$, $70-74$, $75-80$.

Ilmavuotojen luokituksessa on käytetty pintalämpötilan suhteellista alenemista. Lämpökameralla mitattiin pintalämpötila normaaliolosuhteissa (T_{si1}) ja sen jälkeen 50 Pa alipaineessa (T_{si2}). Tämä lämpötilan muutos on jaettu sisä- ja ulkolämpötilan erotuksella:

$$\Delta T = \frac{T_{si1} - T_{si2}}{T_i - T_e} \cdot 100 \quad (2.3.2)$$

Tilastollisessa tarkastelussa kylmäsillat ja ilmavuodot luokiteltiin niiden sijaintipaikkojen ja tyyppien perusteella. Erikseen tarkasteltiin seuraavia paikkoja: ulkoseinän – alapohjan liitos, ulkoseinän – välipohjan liitos, ulko-/väliseinän – yläpohjan liitos, ulkoseinän – ulko-/väliseinän liitos, ovet – ikkunat ja niiden asennukset, ilmansulun läpiviennit ja sähköasennukset.

2.3.4 Tulokset

Tilastollisessa tarkastelussa on käytetty 21 pientalon ja 13 kerrostaloasunnon mittaustietoja. Kuvissa 2.3.1 ja 2.3.2 on esitetty kaksi esimerkkiä mittaustuloksista.

Tyypilliset kylmäsillat mitatuissa pientaloissa ja kerrostaloasunnoissa olivat ovien ja ikkunoiden liitoksissa sekä ovissa ja ikkunoissa itsessään (kuva 2.3.3 vasen). Normaaliolosuhteissa matalia pintalämpötiloja esiintyi pientaloissa lisäksi ulkoseinien liitoksissa alapohjiin, välipohjiin, yläpohjiin ja ulkoseiniin ja kerrostaloissa ulkoseinien liitoksissa alapohjiin. Neljännes kylmäsilloista oli vakavia ($TI < 65$) (Kalamees 2007; RT 14-10850 2005), eli ne on korjattava tai korjaustarve selvitettävä. Kuvassa 2.3.4 on esitetty vakavien kylmäsillojen jakauma pientaloissa ja kerrostaloasunnoissa.

Pientaloista lähes 80 % oli sellaisia, missä vakavia kylmäsilloja ei ollut ulkovaipan liitoksissa ja 50 % oli sellaisia, missä vakavia kylmäsilloja ei ollut ovien ja ikkunoiden liitoksissa (kuva 2.3.5 vasen). Kerrostaloissa vakavia kylmäsilloja oli vain ovissa ja ikkunoissa tai niiden liitoksissa seinärakenteeseen (kuva 2.3.5 oikea).

Kylmäsillojen ja ilmavuotopaikkojen jakaumaan vaikuttaa liitostyyppien esiintyminen kussakin mitattavassa kohteessa. Esimerkiksi yksikerroksisessa pientalossa ei ole välipohja-ulkoseinä-liitosta ja kaikissa kerrostaloasunnoissa ei ole ylä- eikä alapohjaa. Ovi- ja ikkunavuotojen lisäksi yksikerroksisen pientalon tapauksessa nousee esiin ulkoseinä-yläpohja-liitoksen ilmavuoto ja monikerroksisen pientalon vertailuissa näiden lisäksi myös ulkoseinä-välipohja-liitoksen ilmavuoto (kuva 2.3.6 vasen). Kerrostaloissa alimman ja ylimmän kerroksen asunnoissa korostuu ulkoseinä-yläpohja-liitoksen ilmavuoto (ovi- ja ikkunavuotojen lisäksi) ja välikerrosten asunnoissa korostuu ulkoseinä-välipohja-liitoksen ilmavuoto (kuva 2.3.6 oikea).

Tyypilliset ilmavuotopaikat mitatuissa pientaloissa ja kerrostaloasunnoissa olivat ulkoseinän liitoksissa yläpohjan ja välipohjan kanssa sekä ovien ja ikkunoiden liitoksissa (myös ovet ja ikkunat itse) (kuva 2.3.3 oikea ja kuva 2.3.7). Eri runkorakenteilla ei ollut merkittävää vaikutusta ovien ja ikkunoiden liitoksissa havaittuihin ilmavuotoihin.

Pintalämpötilan suhteellista alenemista käytettiin ilmavuotojen luokituksessa. Tuloksia tarkasteltaessa täytyy ottaa huomioon, että jos ilmavuotopaikassa on myös kylmäsilta, pintalämpötilan suhteellinen aleneminen on pienempi, kuin tilanteessa, jossa kohdassa olisi vain ilmavuoto. Myös ilmavuotoreitti voi vaikuttaa pintalämpötilan alenemiseen. Siksi pintalämpötilan suhteellinen aleneminen on enemmänkin suuntaa antava kuin absoluuttinen luokitus.

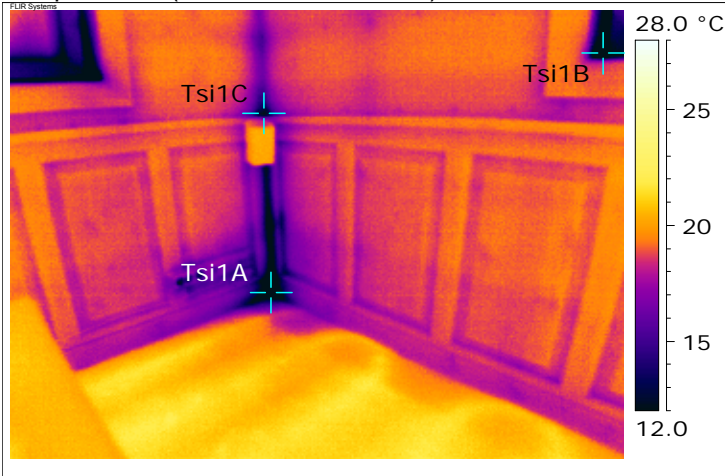
Valokuva



Talon tiedot:

Yläpohja, ulkoseinä:
puurakenteinen (höyryn- ja
ilmansulku: rakennuspaperi
(teipatut limisaumat)); alapohja:
maanvarainen betonilaatta
Ilmavuotoluku: n_{50} : 3,5 1/h
Ilmanvaihtojärjestelmä: koneellinen
tulo-poistoilmanvaihto (käsissäätö)
Ilmanvaihtoluku käyttöasennossa:
0,37 1/h
Lämmönjakojärjestelmä:
vesikeskuslämmitys lattialämmitys
Rakentamisvuosi: 2002

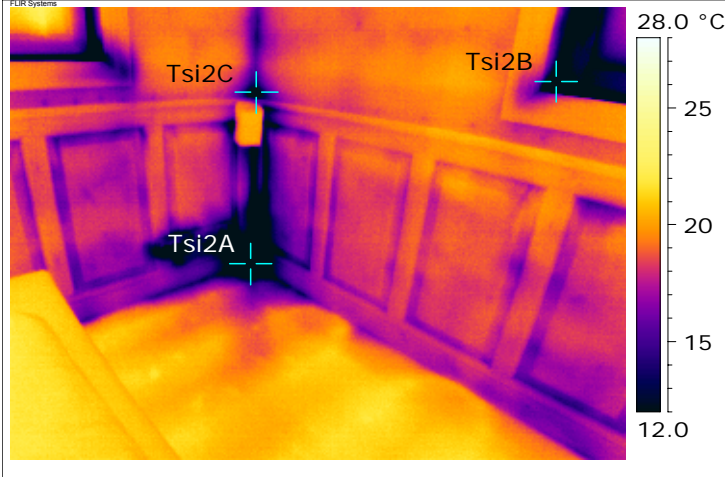
Lämpökuva 1 (normaaliolosuhteissa).



Olosuhteet

Ulkolämpötila	-15 °C
Sisälämpötila	21 °C
Mittaustulokset	
T_{si1A}	5,6 °C
T_{si1B}	4,5 °C
T_{si1C}	12,1 °C
TI_{si1A}	57
TI_{si1B}	54
TI_{si1C}	75

Lämpökuva 2 (50 Pa alipainetilanteessa).



Olosuhteet

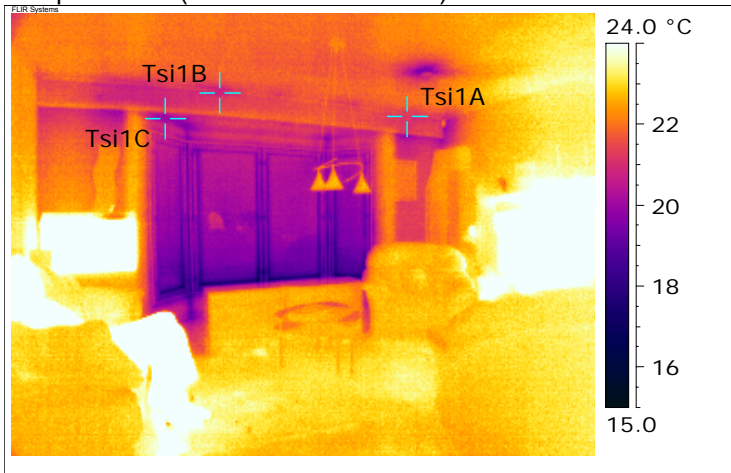
Ulkolämpötila	-15 °C
Sisälämpötila	21 °C
Mittaustulokset	
T_{si2A}	-3,0 °C
T_{si2B}	3,6 °C
T_{si2C}	9,7 °C
TI_{si2A}	33
TI_{si2B}	52
TI_{si2C}	69
Pintalämpötilan suhteellinen aleneminen	
$\Delta T A$	24 %
$\Delta T B$	3 %
$\Delta T C$	7 %

Kuva 2.3.1 Kylmäsilta ikkunan liittoksessa, ilmavuoto ulkoseinän-alapohjan liittoksessa.

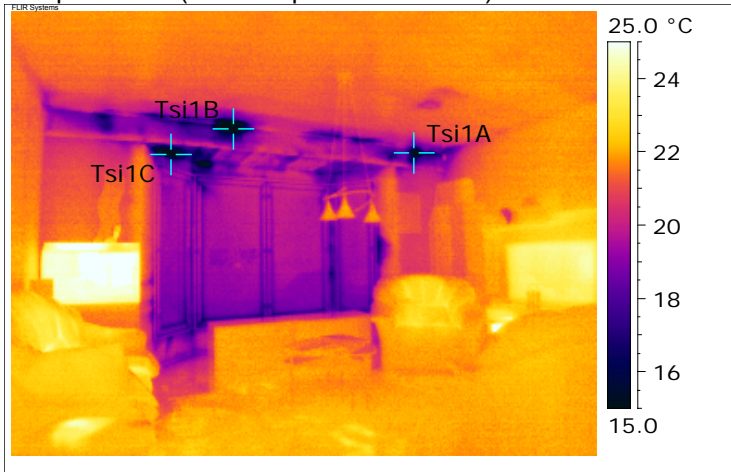
Valokuva



Lämpökuvakuva 1. (normaaliolosuhteissa)



Lämpökuvakuva 2. (50 Pa alipainetilanteessa)



Kuva 2.3.2 Ilmavuoto ulkoseinän-yläpohjan liitoksessa.

Talon tiedot:

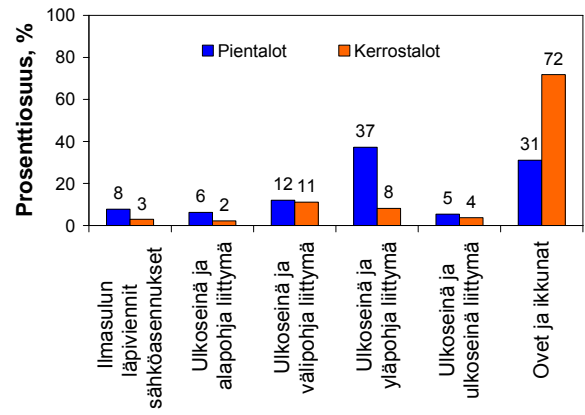
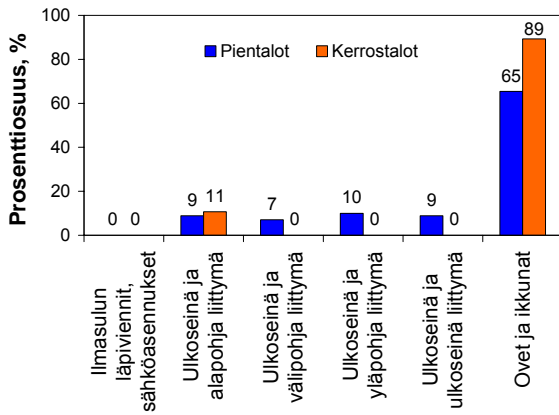
Yläpohja: puurunko (höyryn- ja ilmansulku: muovikalvo (teipatut limisaumat), muovi on tiivistetty ulkoseinän elementteihin);
 Ulkoseinä: betonielementti;
 alapohja: tuuletettu betonialapohja.
 Ilmavuotoluku: n_{50} : 2,5 1/h
 Ilmanvaihtojärjestelmä: koneellinen tulo- poistoilmanvaihto (hiilidioksidikosteusohjaus)
 Ilmanvaihtoluku käyttöasennossa: 0,73 1/h
 Lämmönjakojärjestelmä: vesikeskuslämmitys lattialämmitys
 Rakentamivuosi: 2003

Olosuhteet

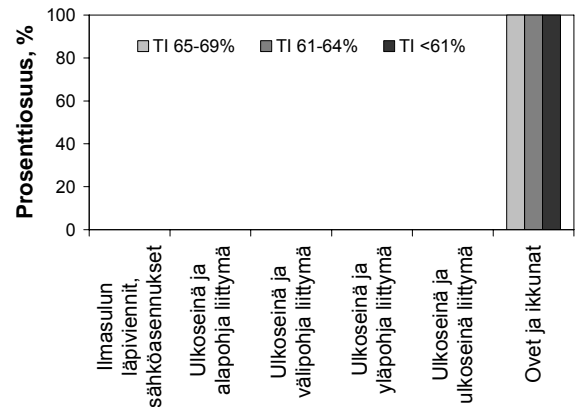
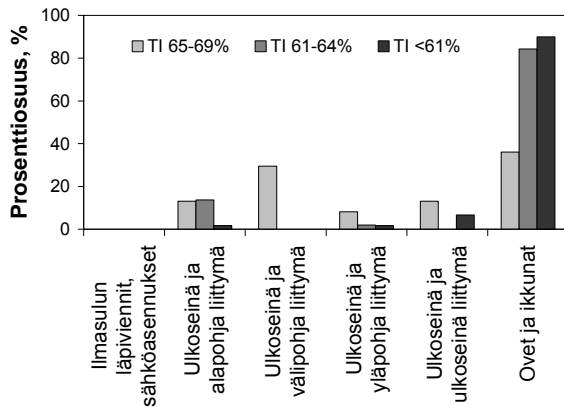
Ulkolämpötila	-17 °C
Sisälämpötila	21,5 °C
Mittaus tulokset	
T _{si2A}	21,2 °C
T _{si2B}	20,8 °C
T _{si2C}	19,9 °C
TI _{si2A}	99
TI _{si2B}	97
TI _{si2C}	93

Olosuhteet

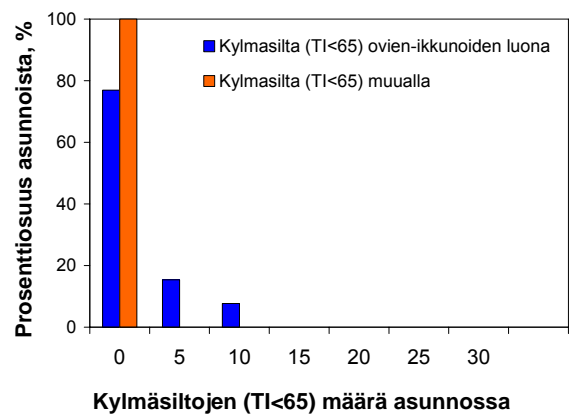
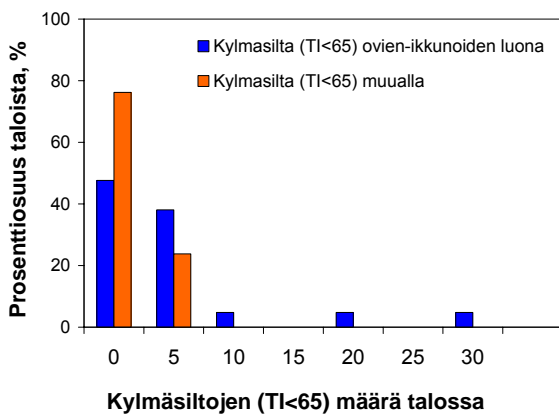
Ulkolämpötila	-1,7 °C
Sisälämpötila	21,5 °C
Mittaus tulokset	
T _{si2A}	14,3 °C
T _{si2B}	12,8 °C
T _{si2C}	13,5 °C
TI _{si2A}	69
TI _{si2B}	62
TI _{si2C}	65
Pintalämpötilan suhteellinen aleneminen	
ΔT A	30 %
ΔT B	34 %
ΔT C	28 %



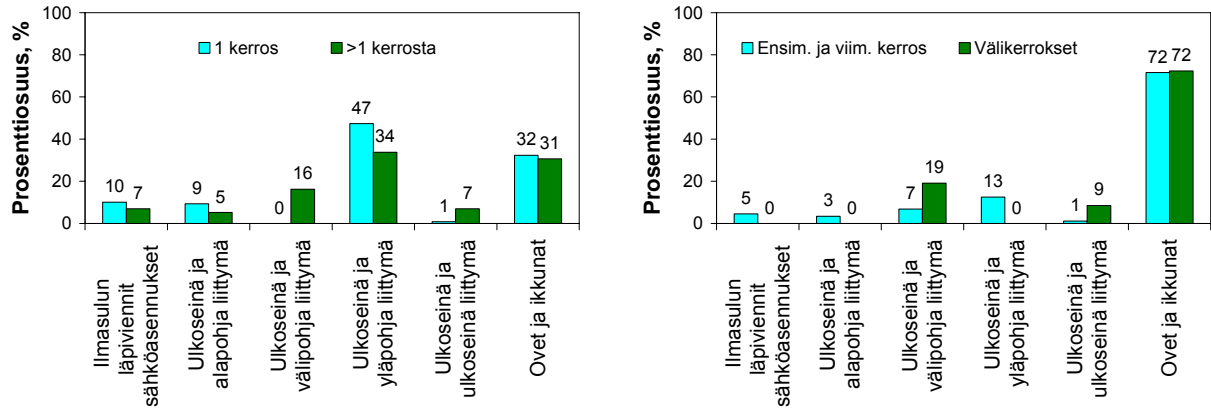
Kuva 2.3.3 Kylmäsiltojen ja normaalitilanteen ilmavuotojen vaikutuksen paikkajakauma (vasen) ja alipaineen aikana havaittujen ilmavuotopaikkojen jakauma (oikea) pientaloissa ja kerrostaloissa.



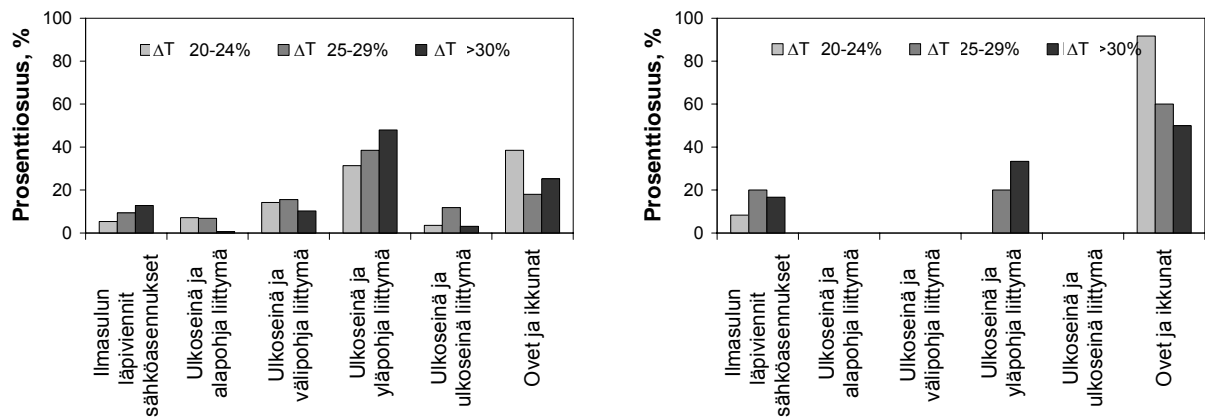
Kuva 2.3.4 Vakavien kylmäsiltojen ja normaalitilanteen ilmavuotojen vaikutuksen paikkajakauma eri lämpötilaindeksien välillä pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).



Kuva 2.3.5 Vakavien kylmäsiltojen ja normaalitilanteen ilmavuotopaikkojen vaikutuksen määrä pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).



Kuva 2.3.6 Ilmavuotokohtien jakauma kerrosten mukaan pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).



Kuva 2.3.7 Vakavien ilmavuotokohtien jakauma pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).

2.4 Ilmanvaihto

Tässä luvussa tarkastellaan mitattujen asuntojen ilmanvaihtoa ja äänitasoja. Kaikkiaan mitattiin ilmavirtoja 70 pientalosta ja 55 kerrostaloasunnosta. Kohteista mitattiin poistoilmamäärät ja koneellisella tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetuista kohteista myös makuuhuoneiden tuloilmamäärät ilmanvaihtojärjestelmän minimi-, maksimi- ja käyttötilan nopeudella. Myös ilmanvaihtojärjestelmän äänitasot asuinhuoneissa mitattiin.

2.4.1 Mittausmenetelmät

2.4.1.1 Ilmanvaihdon kertamittaukset

Koekohteiden ilmanvaihtokertoimet määritettiin mittaamalla talon jokaisen poistoilmaventtiilin ilmamäärät. Mittauksessa käytettiin Airflow LCA 6000 VA -siipipyörä-anemometriä. Ilmamäärät mitattiin ilmanvaihtokoneen eri tehoilla siten, että mukana oli ainakin minimi-, maksimi- ja käyttöasennon teho. Ennen mittauksen aloittamista varmistettiin, että ulko-ovet ja ikkunat olivat kiinni. Yhden mittauspisteen yksittäisen mittauksen kesto oli n. 0,5–1 minuuttia. Mitatuista poistoilmamääristä laskettiin ilmanvaihtokerroin jakamalla poistoilmaventtiileistä mitattujen ilmamäärien summa asunnon ilmatilavuudella (kaava 3.1).

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{V}_{Vi}}{V} \quad (2.4.1)$$

missä

n	asunnon ilmanvaihtokerroin [1/h]
\dot{V}_{Vi}	yksittäisen poistoilmaventtiilin ilmavirta [m ³ /h]
V	asunnon sisätalavuus [m ³]

Rakennuksen ilmanvaihtokerroin kertoo kuinka monta kertaa tunnissa asunnon ilma vaihtuu. Ilmanvaihtokerroin 0,5 l/h tarkoittaa, että puolet asunnon ilmasta vaihtuu yhden tunnin aikana.

Koekohteiden makuuhuoneissa mitattiin lisäksi tuloilmaventtiilien paine-erot TSI VelociCalc Plus 8388 -paine-eromittarilla. Mitatun paine-eron ja päätelaitetyypin avulla laskettiin valmistajien taulukosta makuuhuoneiden tuloilmamäärät.

Kertamittauksena suoritettavat siipipyöräänemometri- ja paine-eromittaus ovat hetkellisiä mittauksia, jotka eivät välttämättä kuvaa ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa pitkällä aikavälillä. Mittaushetkellä vallitseva toiminnan taso saadaan mitattua, mutta erilaiset aikaohjaukset yms. saattavat muuttaa todellista kokonaisilmanvaihtokerrointa paljonkin. Mittaus ei myöskään ota huomioon ikkunatuuletusta eikä vuotoilmaa.

2.4.1.2 Äänitasomittaukset

Äänitasomittaukset suoritettiin B&K 2260 -äänianalysoitsijalla. Keskiäänitason $L_{A,eq,T}$ [dB] (A-painotettu) mittaus suoritettiin huonetilan keskeltä. Mittaukset suoritettiin kohteiden olohuoneessa ja kahden hengen makuuhuoneessa. Äänenpainetaso mitattiin hetkellisesti ilmanvaihtokoneen eri asennoilla. Taustaääntä ei mitattu koneellisella ilmanvaihdolla varustetuissa kohteissa, sillä monissa tapauksissa ilmanvaihtokoneen kytkeminen pois ei ollut mahdollista ilman virran katkaisemista koneesta. Liesituulettimen äänenpainetasoa ei mitattu erikseen. Joissakin tapauksissa keittiön poisto oli kytketty liesituulettiimeen.

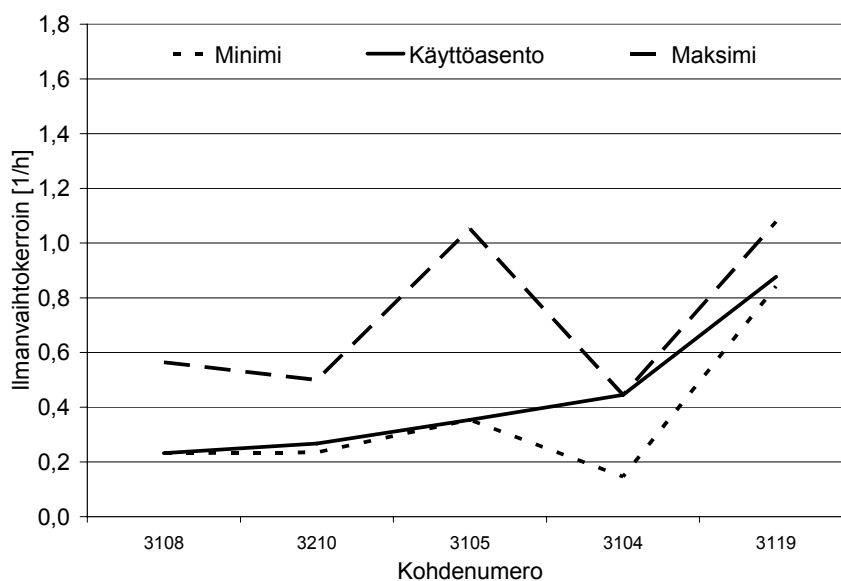
2.4.2 Pientalojen tulokset

2.4.2.1 Pientalojen ilmanvaihtokertoimet

Ilmanvaihtokerrointen keskiarvot jäivät alle Rakentamismääräyskokoelmassa D2 (2003) annetun raja-arvon 0,5 1/h molemmissa koneellisen ilmanvaihdon tapauksissa. Taulukossa 2.4.1 on esitetty pientalojen ilmanvaihtokertoimet ilmanvaihdon käyttöasennossa. Kuvassa 2.4.1 on esitetty ilmanvaihtokertoimet koneellisen poistoilmanvaihdon kohteissa ja kuvassa 2.4.2 koneellisen tulo-poistoilmanvaihdon kohteissa.

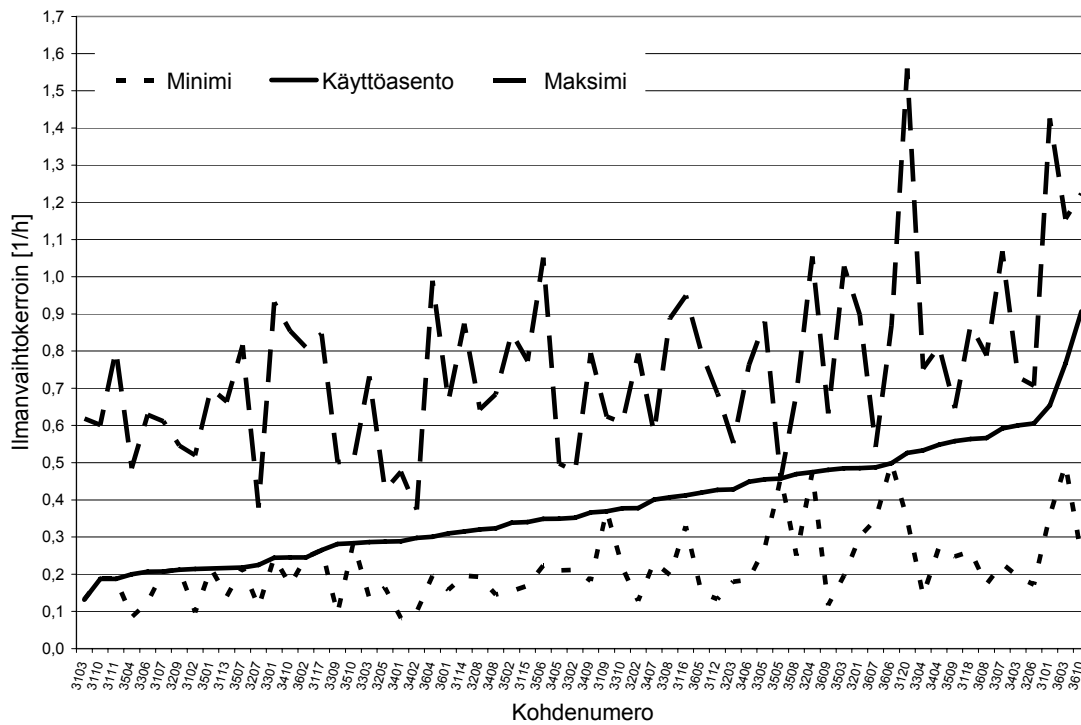
Taulukko 2.4.1 Pientalojen ilmanvaihtokerrointen keskiarvot ilmanvaihdon käyttöasennossa.

	Koneellinen poisto	Koneellinen tulo-poisto
Lukumäärä [kpl]	5	65
Keskimääräinen ilmanvaihtokerroin [1/h]	0,44	0,38
Keskihajonta	0,26	0,15
Minimi [1/h]	0,23	0,13
Maksimi [1/h]	0,88	0,91
Mediaani	0,35	0,36



Kuva 2.4.1 Ilmanvaihtokertoimet koneellisen poiston kohteissa ilmanvaihdon eri säätöasennoilla.

Kuvasta 2.4.1 nähdään, että RakMK D2:ssa annettu ilmanvaihtokertoimen ohjearvo 0,5 1/h ylittyi ainoastaan yhdessä koneellisen poiston kohteessa ilmanvaihdon käyttöasennolla.



Kuva 2.4.2 Ilmanvaihtokertoimet koneellisen tulo-poiston kohteissa ilmanvaihdon eri säätöasunnoilla.

Koneellisen tulo-poiston kohteissa ilmanvaihtokerroin ylitti 0,5 1/h vain 22 %:ssa kohteista (kuva 2.4.2). Pienimmät mitatut ilmanvaihtokertoimet olivat alle 0,2 1/h. 97 %:ssa kohteista ilmanvaihtokerroin 0,5 1/h oli mahdollista saavuttaa jollakin ilmanvaihtokoneen nopeudella.

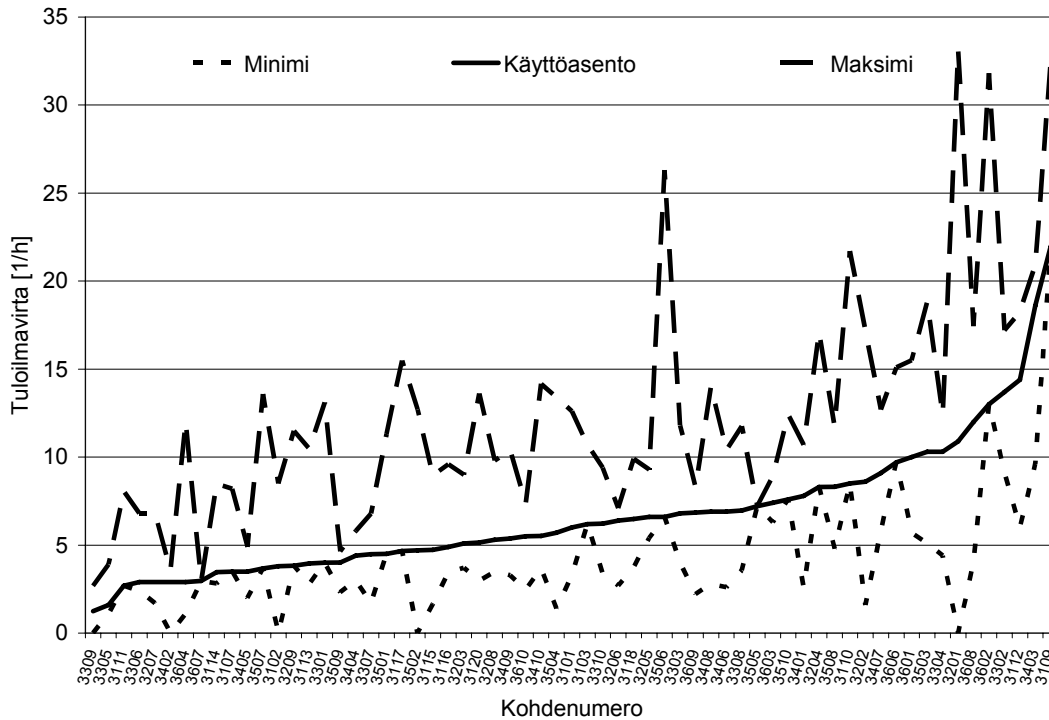
Makuuhuoneiden tuloilmavirrat

Rakentamismääräyskokoelman D2 (2003) ja Sisäilmastoluokitus 2000 (2001) S3-luokan suosituksen mukaisesti makuuhuoneisiin tulisi tulla ilmaa vähintään 6 l/s henkilöä kohden. Sisäilmastoluokituksen luokassa S2 ilmavirran tulisi olla 8 l/s ja S1 luokassa 12 l/s henkilöä kohden (Sisäilmastoluokitus 2000 2001).

Makuuhuoneiden ilmanvaihdon tuloilmavirrat on esitetty taulukossa 2.4.2 ja kuvassa 2.4.3. Kaikkiaan makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat vähäisiä. Vain 7 %:ssa kohteista ylitettiin 12 l/s kahden hengen makuuhuoneissa. Joissakin makuuhuoneissa ilmanvaihtokoneen käyttöasennolla tuloilmavirta oli noin 1 l/s ja ilmanvaihtokoneen minimiasennolla 0 l/s. Sisäilmastoluokan S1 mukaista ilmavirtaa 24 l/s (Sisäilmastoluokitus 2000 2001) ei saavutettu yhdessäkään kohteessa ilmanvaihdon normaalilla käyttöasennolla. 4 %:ssa kohteista olisi ollut mahdollista saavuttaa 24 l/s tuloilmavirta jollakin ilmanvaihtokoneen nopeudella.

Taulukko 2.4.2 Kahden hengen makuuhuoneiden tuloilmavirtojen keskiarvot koneellisen tulo-poiston pientaloissa (63 kpl) ilmanvaihdon eri säätöasennoilla.

	Minimi	Käyttöasento	Maksimi
Tuloilmavirta [l/s]	4,20	6,67	12,27
Keskihajonta	3,46	3,81	6,49
Minimi [l/s]	0,00	1,25	2,69
Maksimi [l/s]	22,00	22,00	33,10
Mediaani	3,49	6,00	11,30



Kuva 2.4.3 Makuuhuoneiden tuloilmavirrat koneellisen tulo-poiston kohteissa ilmanvaihdon eri säätöasennoilla.

2.4.2.2 Ilmanvaihdon äänitasot

Äänitasomittaukset [dB(A)] suoritettiin kahden hengen makuuhuoneesta ja olohuoneesta 41 pientalossa. Äänimittauksilla pyrittiin selvittämään ilmanvaihtokoneen aiheuttamaa melua ja sen mahdollisia vaikutuksia asumisviihtyvyyteen ja ilmanvaihtojärjestelmän käyttöön.

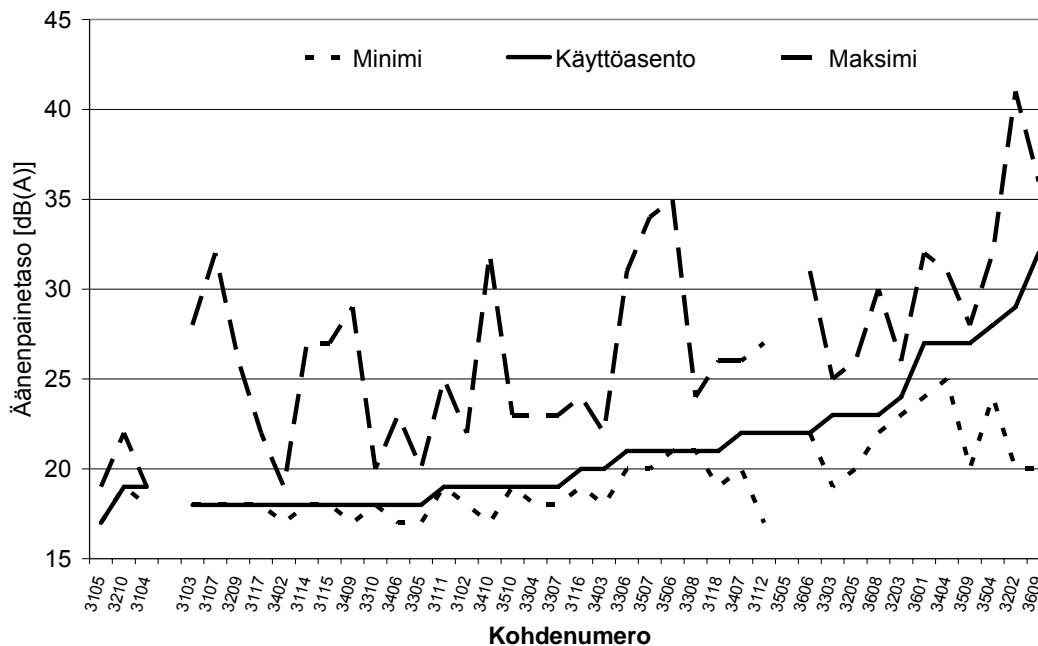
Asuinhuone kuuluu S1-luokkaan, kun äänitaso on alle 25 dB(A) (Sisäilmastoluokitus 2000 2001). Uuden SFS 5907 (2004) -standardin mukaan äänenpainetason tulisi olla alle 24 dB(A).

Äänimittausten perusteella vaihteluväli oli 17–19 desibeliä koneellisen poiston kohteissa ja 18–32 desibeliä koneellisen tulo-poiston kohteissa (taulukko 2.4.3).

Taulukko 2.4.3 Pientalojen ilmanvaihtojärjestelmän äänenpainetasot ilmanvaihdon käyttöasennossa. Vasemmalla kolme koneellisen poiston kohdetta ja oikealla 38 koneellisen tulo-poiston kohdetta.

	Koneellinen poisto	Koneellinen tulo-poisto
Lukumäärä [kpl]	3	38
Keskimääräinen äänenpainetaso [dB(A)]	18,3	21,3
Keskihajonta	1,2	3,6
Minimi [dB(A)]	17	18
Maksimi [dB(A)]	19	32
Mediaani	19	20,5

Makuuhuoneiden äänenpainetasot ilmanvaihdon eri säätöasunnoilla on esitetty kuvassa 2.4.4.



Kuva 2.4.4 Makuuhuoneiden äänenpainetasot ilmanvaihdon eri säätöasunnoissa. Vasemmassa reunassa näkyvät kolme koneellisen poiston kohdetta.

Vertailua koneellisen poiston ja koneellisen tulo-poiston välillä on mahdoton tehdä koneellisen poiston kohteiden vähydestä johtuen. Koneellisen poiston kohteissa vaihteluväli minimin ja maksimin välillä oli monessa kohteessa suuri. Näissä kohteissa konetta käytettiin usein äänen takia minimiasennossa.

2.4.3 Kerrostalojen tulokset

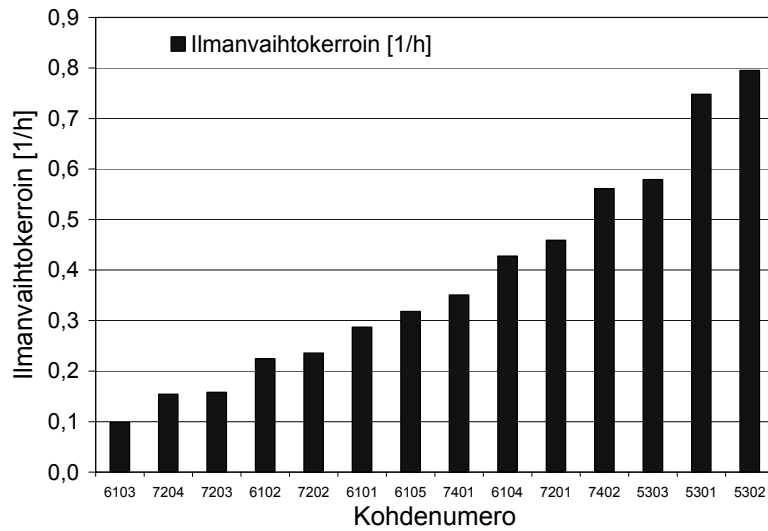
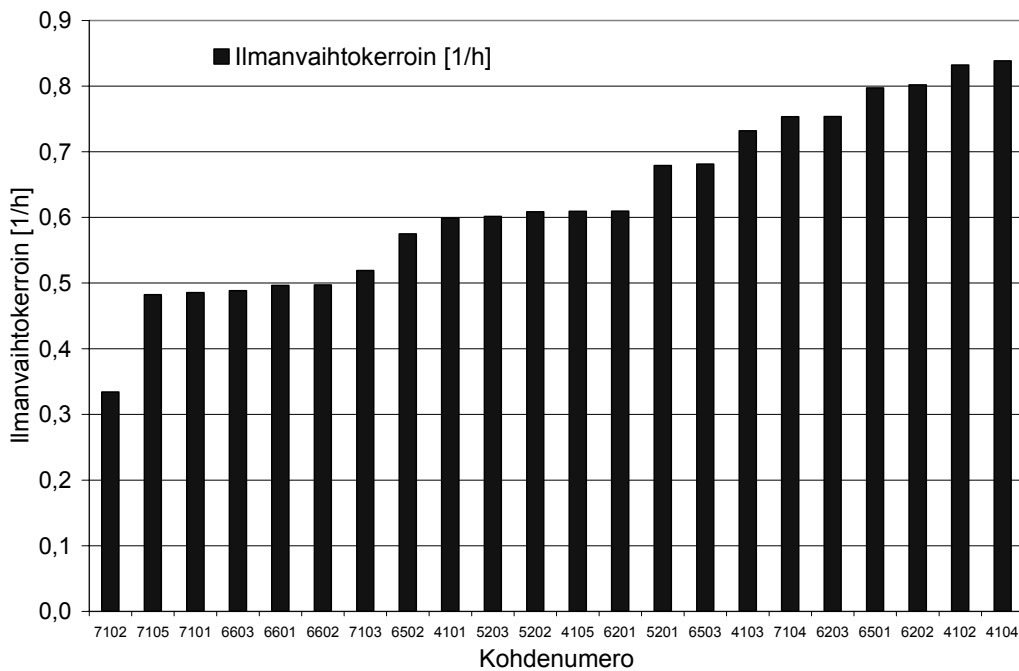
2.4.3.1 Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokertoimet

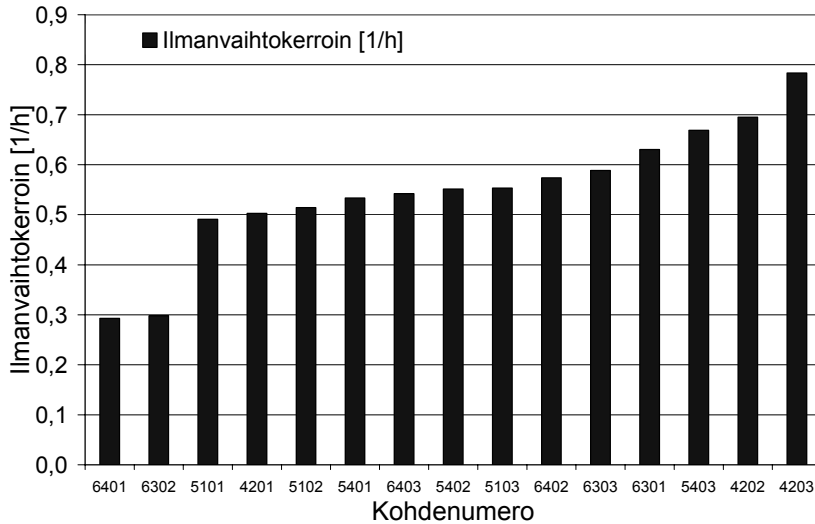
Kerrostalojen ilmanvaihtokertoimet eri ilmanvaihtojärjestelmillä toteutetuissa kerrostaloissa on esitetty taulukossa 2.4.4 sekä kuvissa 2.4.5–2.4.7. Ilmanvaihtokertoimet ylittivät keskimäärin RakMK D2:n (2003) ohjearvon 0,5 1/h keskitetyn ja huoneistokohtaisen koneellisen tulo-poiston kohteissa. Koneellisen poiston kohteissa keskiarvo jäi alle ohjearvon. Kaikkiaan 33 asunnossa jäätiin alle RakMK D2:n ohjearvon.

Taulukko 2.4.4 Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokerrointen keskiarvot ilmanvaihdon käyttöasennossa.

	Koneellinen poisto	Keskitetty koneellinen tulo-poisto*	Huoneistokohtainen koneellinen tulo-poisto
Lukumäärä [kpl]	14	22	15
Keskimääräinen ilmanvaihtokerroin [1/h]	0,39	0,63	0,55
Keskihajonta	0,22	0,14	0,13
Minimi [1/h]	0,10	0,33	0,29
Maksimi [1/h]	0,80	0,84	0,78
Mediaani	0,33	0,61	0,55

* Kolme tarpeenmukaisen ilmanvaihdon asuntoa (CO₂ säätö).

**Kuva 2.4.5** Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokerroimet ilmanvaihdon käyttöasennolla, keskitetty koneellinen poistoilmanvaihto.**Kuva 2.4.6** Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokerroimet ilmanvaihdon käyttöasennolla, keskitetty koneellinen tulo-poistoilmanvaihto.



Kuva 2.4.7 Kerrostaloasuntojen ilmanvaihtokertoimet ilmanvaihdon käyttöasennolla, huoneistokohtainen koneellinen tulo-poistoilmanvaihto.

Koneellisen ilmanvaihdon kohteissa 70 %:ssa asunnoista ilmanvaihto jäi alle RakMK D2:n ohjearvon. Keskitetyn koneellisen tulo-poiston ja huoneistokohtaisen tulo-poiston kohteissa 80 %:ssa asunnoista 0,5 1/h ilmanvaihto toteutui.

Keskitetyllä koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetuista kohteista voidaan kuvan 2.4.5 mukaan havaita, että samassa talossa sijaitsevien asuntojen välillä (asunnon kohdenumeron kaksi ensimmäistä lukua samat) saattoi olla jopa 0,3 1/h ero ilmanvaihtokertoimessa. Myös keskitetyn koneellisen tulo-poiston asunnoissa voidaan havaita yli 0,4 1/h ero saman talon asuntojen välillä. Keskitetyn koneellisen poiston kohteissa asukkaat saattavat itse säätää raitisilmaventtiilien aukioloastetta ja siten pienentää oman asuntonsa ilmanvaihtokerrointa.

Huoneistokohtaisen koneellisen tulo-poiston kohteissa suurin ero asuntojen välillä oli myös melkein 0,3 1/h. Koska koneet ovat huoneistokohtaisesti säädettävissä, erot selittyvät tässä tapauksessa asukkaiden itse tekemillä erilaisilla ilmanvaihdon säädöillä.

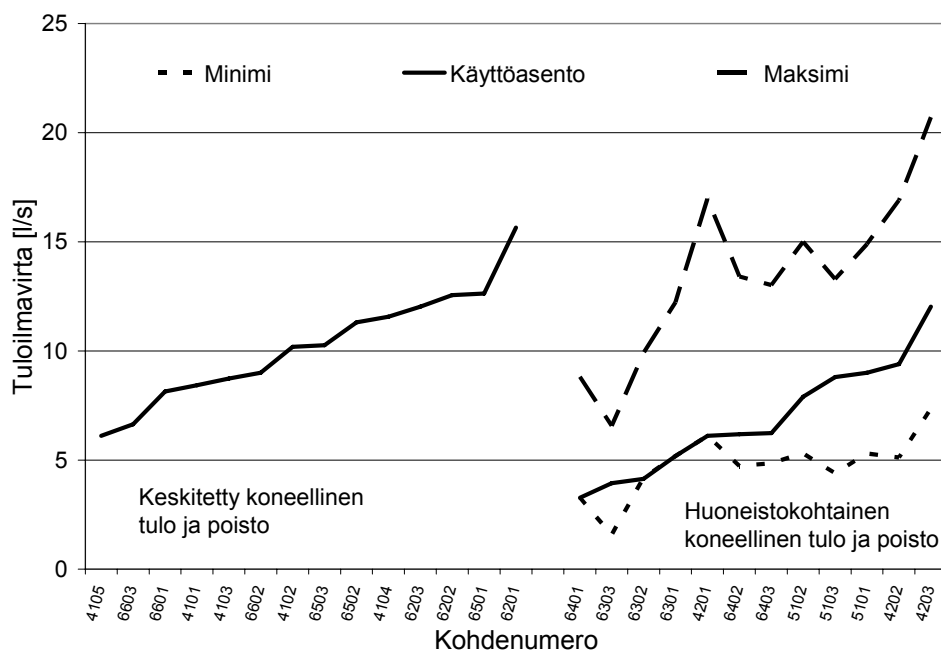
2.4.3.2 Makuuhuoneiden tuloilmavirrat

Makuuhuoneiden tuloilmavirrat eri ilmanvaihtojärjestelmillä toteutetuissa kerrostaloissa on esitetty taulukossa 2.4.5 ja kuvassa 2.4.8. Sekä keskitetyn tulo-poiston että huoneistokohtaisen tulo-poiston tuloilmavirrat makuuhuoneisiin alittivat RakMK D2:n 6 l/s henkilöä kohden raja-arvon kahden hengen makuuhuoneissa. Keskitetyn koneellisen tulo-poiston kohteissa tilanne oli parempi, sillä keskimääräinen tuloilmavirta jäi vain hieman alle RakMK D2:n raja-arvon.

Taulukko 2.4.5 Kerrostalojen kahden hengen makuuhuoneiden tuloilmavirtojen keskiarvot ilmanvaihdon käyttöasennossa.

	Keskitetty koneellinen tulo-poisto*	Huoneistokohtainen koneellinen tulo-poisto
Lukumäärä [kpl]	16	21
Keskimääräinen tuloilmavirta makuuhuoneissa [l/s]	11,1	6,6
Keskihajonta	3,2	2,6
Minimi [l/h]	6,1	3,3
Maksimi [l/h]	15,9	12,6
Mediaani	10,8	6,1

* Kolme tarpeenmukaisen ilmanvaihdon asuntoa (CO₂ säätö).



Kuva 2.4.8 Kerrostaloasuntojen makuuhuoneiden tuloilmavirrat eri ilmanvaihtojärjestelmillä ja ilmanvaihdon eri säätöasunnoilla.

Keskitetyn tulo-poistoilmanvaihdon kohteissa makuuhuoneisiin tuli tuloilmavirtaa selvästi enemmän kuin huoneistokohtaisen tulo-poistoilmanvaihdon kohteissa (kuva 2.4.8).

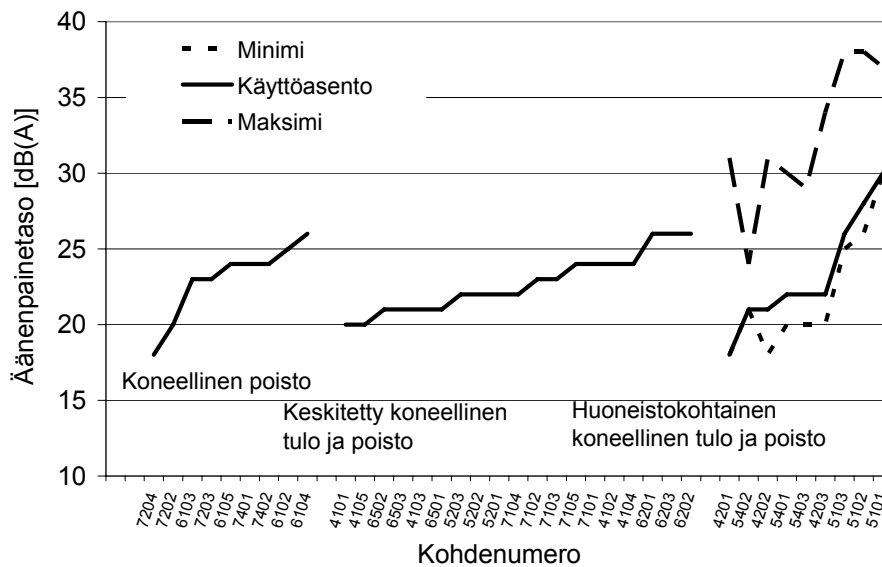
2.4.3.3 Ilmanvaihdon äänitasot

Ilmanvaihdon äänitasot mitattiin 37 kerrostaloasunnossa. RakMK D2:n mukaan asuintilassa saa äänitaso olla enintään 28 dB(A). Kerrostaloasuntojen äänitasot asunnoissa ilmanvaihtojärjestelmän käyttöasennolla olivat keskimäärin 23 dB(A) (taulukko 2.4.6). Koneellisen poiston ja keskitetyn koneellisen tulo-poiston asunnoissa taustamelulähteet pyrittiin poistamaan mittauksen aikana mahdollisuuksien mukaan.

Taulukko 2.4.6 Ilmanvaihtojärjestelmän äänenpainetasot kerrostaloasunnoissa ilmanvaihdon käyttöasennossa.

	Koneellinen poisto	Keskitetty koneellinen tulo-poisto*	Huoneistokohtainen koneellinen tulo-poisto
Keskimääräinen äänitaso [dB(A)]	23	23	23
Keskihajonta	2,5	1,9	3,8
Minimi [dB(A)]	18	20	18
Maksimi [dB(A)]	26	26	30
Mediaani	24	22	22

* Kolme tarpeenmukaisen ilmanvaihdon asuntoa (CO₂ säätö).



Kuva 2.4.9 Kerrostaloasuntojen makuuhuoneiden äänenpainetasot eri ilmanvaihtojärjestelmillä ja ilmanvaihdon eri säätöasunnoilla.

Keskitetyn koneellisen poiston ja koneellisen tulo-poiston kohteissa ilmanvaihtojärjestelmän tuottama äänitaso huoneisiin jäi alle 28 dB(A):n kaikissa kohteissa (kuva 2.4.9). Huoneistokohtaisen koneellisen poiston kohteissa äänitasot nousivat käyttöasennossa yli RakMK D2:n raja-arvon kahdessa kohteessa.

2.4.4 Tulosten tarkastelu

Mitattujen pientalojen vallitsevana ilmanvaihtojärjestelmänä oli koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Tulokset olivat samansuuntaiset kuin ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimushankkeessa koneellisen tulo-poiston osalta (Vinha et al. 2005). Ilmanvaihtokerrointen keskiarvo oli 0,38 1/h, joka oli alle Rakentamismääräyskokoelman D2 (2003) ohjearvon 0,5 1/h. 97 %:ssa kohteista 0,5 1/h ilmanvaihtokerroin olisi ollut saavutettavissa jollakin ilmanvaihtokoneen käyttöasennolla.

Makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat pientaloissa alhaiset. 42 %:ssa tapauksista tuloilmavirta oli alle 6 l/s kahden hengen makuuhuoneissa ja 94 %:ssa kohteista alle 12 l/s, joka on RakMK D2:ssa annettu ohjearvo. Keskimääräinen tuloilmavirta oli 6,7 l/s.

Pientalojen ilmanvaihdon äänitasot olivat alhaiset sekä koneellisen poiston että tulo-poistoilmanvaihdon kohteissa. Äänitasot olivat keskimäärin alle 22 dB(A) makuuhuoneista mitattuna. Vain yhdessä kohteessa äänenpainetaso oli käyttöasennossa 32 dB(A). RakMK D2:ssa annetun määräyksen mukaan ilmanvaihdon aiheuttaman äänenpainetason tulee olla enintään 28 dB(A).

Kerrostalojen ilmanvaihtojärjestelmät jakoutuivat keskitettyyn koneelliseen poistoon, keskitettyyn koneelliseen tulo-poistoon ja huoneistokohtaiseen tulo-poistoon. Vain koneellisen poiston kohteissa kohteiden keskiarvo jäi alle 0,5 1/h. Suurin keskiarvo oli keskitetyn koneellisen tulo-poiston ryhmällä 0,63 1/h. Tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetuissa kohteissa 80 %:ssa kohteista RakMK D2:n ohjearvo toteutui.

Koneellisella tulo-poistoilmanvaihdolla toteutetuissa kerrostaloissa makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat suurempia kuin pientalokohteissa. Huoneistokohtaisen koneellisen tulo-poiston makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat selvästi pienempiä kuin keskitetyn tulo-poisto kohteissa. Tuloilmavirtojen keskiarvot olivat 11,1 l/s (keskitetty koneellinen tulo-poisto) ja 6,6 l/s (huoneistokohtainen tulo-poisto).

Makuuhuoneiden äänenpainetasot kerrostaloasunnoissa olivat alhaisia. Keskiarvo oli 23 dB(A) kaikissa kohderyhmissä. Vain kahdessa kohteessa ylitettiin RakMK D2:n raja-arvo 28 dB(A).

2.5 Lämpö- ja kosteusolot

2.5.1 Mittaukset

Sisä- ja ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin pääsääntöisesti paristokäyttöisillä Comark Dilligence EV (N2003 ja N2013) -dataloggereilla. Loggereiden tarkkuus on lämpötilan osalta $\pm 0,5$ °C ja suhteellisen kosteuden osalta ± 3 % RH.

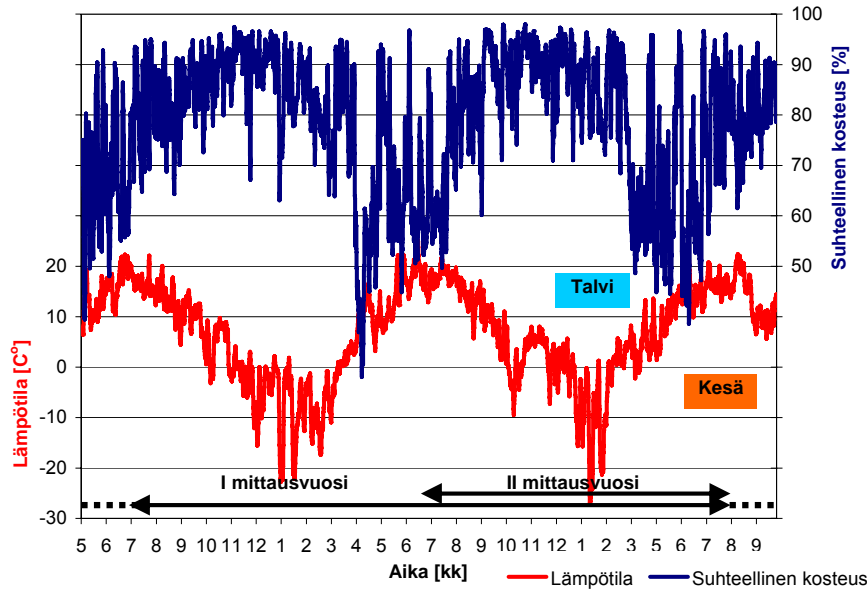
Loggerit tallensivat lukemat kerran tunnissa ja niiden muistiin mahtui lähes koko vuoden mittausdata. Loggerit purettiin kuitenkin myös mittausjakson puolivälissä datan mahtumisen varmistamiseksi, välidatan saamiseksi ja loggereiden toiminnan varmistamiseksi. Kaikkiin kohteisiin laitettiin mittausloggeri päämakuuhuoneeseen, joka oli vanhempien makuuhuone. Sisäloggerit asennettiin huoneessa edustavaan paikkaan väliseinille, jotta ulkoseinien pintalämpötila ei olisi vaikuttanut mittaustuloksiin. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen lämpötila- ja RH-arvoja Helsingistä, Tampereelta, Jokioisista, Hämeenlinnasta, Lahdesta, Turusta ja Oulusta.

2.5.2 Ulkoilmaston olosuhteet

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaukset tehtiin toukokuun 2005 ja syyskuun 2007 välisenä aikana. Dataloggerit asennettiin koekohteisiin sekä vuonna 2005 että 2006. Jotta koko analysoitava mittausaineisto olisi samalta vuodelta, ensimmäisen vuoden koekohteissa mittauksia jatkettiin kahden vuoden ajan. Taulukossa 2.5.1 ja kuvassa 2.5.1 on esitetty esimerkkinä ulkoilman lämpötilat ja suhteelliset kosteudet Tampereella mittausjakson aikana. Taulukossa 2.5.1 lämpötila- ja RH-olosuhteet on esitetty kuukauden keskiarvoina ja kuvassa 2.5.1 päivän keskiarvoina.

Taulukko 2.5.1 Ulkoilman kuukauden keskilämpötila, T [°C] ja suhteelliset kosteudet, RH [%] mittausjakson aikana Tampereella.

	Heinäk.		Elok.		Syysk.		Lokak.		Marrask.		Jouluk.		Tammik.		Helmik.		Maalisk.		Huhtik.		Toukok.		Kesäk.	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Tampere 2005-06	18,4	71	15,3	83	11,5	82	6,6	86	3,7	91	-4,6	90	-5,0	88	-9,2	85	-7,7	79	3,9	71	10,1	65	15,5	66
Tampere 2006-07	18,2	62	17,9	71	12,9	83	6,5	90	1,4	91	2,7	89	-3,6	89	-11,7	84	2,3	82	2,7	65	10,2	68	15,1	62



Kuva 2.5.1 Koko mittausjakson ulkoilmaston olosuhteet vuorokauden keskiarvoina Tampereen alueelta.

Ulkoilmaston olosuhteiden perusteella valittiin toiselta vuodelta kesä- ja talvijakso, jota käytettiin koekohteiden tarkasteluissa. Kesäjakso alkoi, kun kaikki loggerit oli asennettu taloihin ja ulkoilmaston vuorokauden keskilämpötila oli yli 15 °C. Talvijaksoksi valittiin jouluhelmikuu. Kuvassa 2.5.2 on esitetty esimerkkinä kesä- ja talvijaksojen ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus mittaustuloksina ja vuorokauden keskiarvoina Tampereen alueelta.



Kuva 2.5.2 Toisen mittausvuoden kesäjakson (vasen) ja talvijakson (oikea) ulkoilmaston olosuhteet mittaustuloksina ja vuorokauden keskiarvoina (paksumpi viiva) Tampereen alueelta.

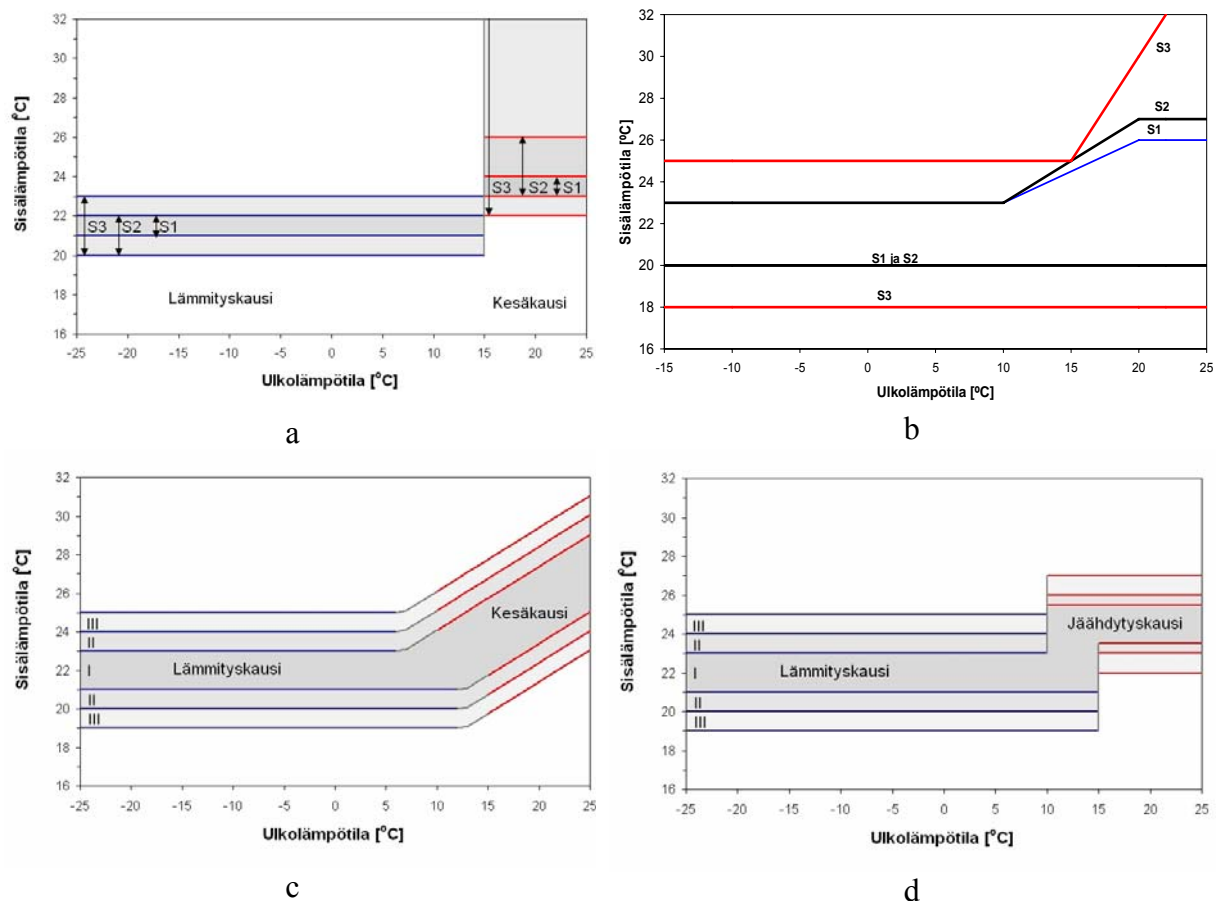
2.5.3 Sisäilmaston olosuhteiden tavoitearvot

Sisäilmaston olosuhteiden arvioinnissa käytettiin Sisäilmastoluokitus 2000 (2001) lisäksi myös standardien CR 1752 (1998) ja SFS-EN 15251 (2007) tavoitearvoja (taulukko 2.5.2 ja kuva 2.5.3). Kuvassa 2.5.3 on esitetty vertailun vuoksi myös uuden Sisäilmastoluokituksen 2008 (2008) sisälämpötilan tavoitearvot. Standardit jakavat sisäilmasto-olosuhteet lämpöviihtyvyyden perusteella kolmeen luokkaan: I, II, III (SFS-EN 15251 2007) tai A, B, C (CR 1752 1998). Sisäilmastoluokitusten 2000 ja 2008 luokka S1 vastaa likimain standardien tasoa I tai A, luokka S2 tasoa II tai B ja luokka S3 tasoa III tai C.

Rakennuksen käyttöaikana ei oleskeluvyöhykkeen lämpötila yleensä saa olla korkeampi kuin 25 °C. Ulkoilman lämpötilan viiden tunnin enimmäisjakson keskiarvon ollessa korkeampi kuin 20 °C voi huoneilman lämpötila ylittää tämän arvon korkeintaan 5 °C.

Taulukko 2.5.2 Sisäilmaston olosuhteiden tavoitearvot (CR 1752 1998, SFS-EN 15251 2007).

	I tai A (korkea taso)	II tai B (keskitaso)	III tai C (perustaso)
Keskimääräinen lämpöaistimus, PMV (Predicted Mean Vote)	-0,2<PMV<0,2	-0,5<PMV<+0,5	-0,7<PMV<+0,7
Lämpöolosuhteisiin tyytymättömien osuus, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), %	< 6	< 10	< 15
Huonelämpötila kesällä	24,5±1,0 °C	24,5±1,5 °C	24,5±2,5 °C
Huonelämpötila talvella	22,0±1,0 °C	22,0±2,0 °C	22,0±3,0 °C



Kuva 2.5.3 Sisäolosuhteiden kriteerit: a: Sisäilmastoluokitus 2000 (2001); b: Sisäilmastoluokitus 2008 (2008) c: CR 1752 (1998), SFS-EN 15251 (2007) ei-jäähdytetty sisäilmasto; d: CR 1752 (1998), SFS-EN 15251 (2007) jäähdytetty sisäilmasto.

Mikäli taloissa ei ole jäähdytystä ja on mahdollista avata ikkunoita ja valita vaatetusta, voi standardin SFS-EN 15251 (2007) mukaan käyttää kesäaikana sisäilman ja ulkoilman välistä riippuvuutta (kuva 2.5.3 c). Ulkolämpötila voi olla joko edellisen 24 h liukuva keskiarvo tai sitä määrittäessä voidaan myös ottaa huomioon 7 edeltävän vuorokauden lämpötilat (kaava 2.5.1) (SFS-EN 15251 2007).

$$T_{\text{rm}} = \frac{T_{\text{ed-1}} + \alpha \cdot T_{\text{ed-2}} + \alpha^2 \cdot T_{\text{ed-3}} + \alpha^3 \cdot T_{\text{ed-4}} + \alpha^4 \cdot T_{\text{ed-5}} + \alpha^5 \cdot T_{\text{ed-6}} + \alpha^6 \cdot T_{\text{ed-7}}}{1 + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \alpha^4 + \alpha^5 + \alpha^6} \quad (2.5.1)$$

missä

T_{rm} laskettavan vuorokauden lämpötilan juokseva keskiarvo [°C]

$T_{\text{ed-1}}$ edellisen vuorokauden lämpötilan keskiarvo [°C]

α kerroin 0–1, suositeltava 0,8.

Jos kerroin α on 0, lasketaan vain edellisen 24 h liukuva keskiarvo.

SFS-EN 15251 (2007) standardissa annetaan myös suhteellisen kosteuden tavoitearvoja kuivatukselle (kosteaa kausi (kesä-syksy)) ja kostutukselle (kuiva kausi (talvi)) (taulukko 2.5.3).

Taulukko 2.5.3 Sisäilman suhteellisen kosteuden tavoitearvot (SFS-EN 15251 2007)

	Sisäilmaluokka, (SFS-EN 15251, 2007)		
	I	II	III
Suhteellisen kosteuden tavoitearvo kuivatukselle	50 %	60 %	70 %
Suhteellisen kosteuden tavoitearvo kostutukselle	30 %	25 %	20 %

Aikaisemmassa Sisäilmastoluokituksessa 2000 (2001) sisäilmastoluokassa S1 oli sisäilman suhteellisen kosteuden tavoitearvo talvella 25–45 % RH. Muihin sisäilmastoluokkiin ei esitetty suhteellisen kosteuden tasolle tavoitearvoja. Nykyisessä Sisäilmastoluokituksessa 2008 (2008) ei enää esitetä suhteellisen kosteuden raja-arvoja missään sisäilmastoluokassa. Sisäilman kosteuden vuorokausivaihteluille ei ole esitetty tavoitearvoja Sisäilmastoluokituksissa eikä kansainvälisissä standardeissa.

Tässä tutkimuksessa sisäilman suhteellisen kosteuden tavoitetasoksi on asetettu 20–60 % RH.

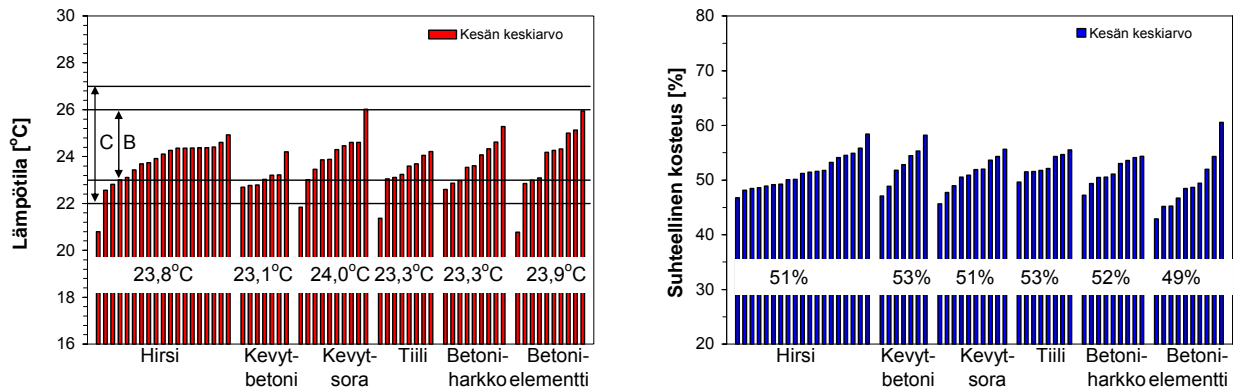
2.5.4 Sisäilmaston olosuhteet

2.5.4.1 Kesäaikaiset lämpötilat ja suhteellinen kosteus

Kesällä sisälämpötila vaihteli pientaloissa 14 °C ja 29 °C välillä ja kerrostaloissa 21 °C ja 29 °C välillä. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli pientaloissa 33 % RH ja 86 % RH välillä ja kerrostaloissa 34 % RH ja 68 % RH välillä. Kesäjakson sisälämpötilan keskiarvo oli pientaloissa 23,7 °C (taloista mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 20,8–26,0 °C) ja kerrostaloissa 24,7 °C (asunnoista mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 23,5–26,1 °C). Suhteellisen kosteuden keskiarvo oli pientaloissa 51 % RH (taloista mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 43–61 % RH) ja kerrostaloissa 47 % RH (asunnoista mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 44–52 % RH).

Kaikkien pientalojen kesäaikaisen sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot ja niiden vertailu eri talotyyppien välillä on esitetty kuvassa 2.5.4. Jokainen pylväs kuvaa yhtä

taloa. Kesän lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot sisäilmassa on esitetty taulukossa 2.5.4.



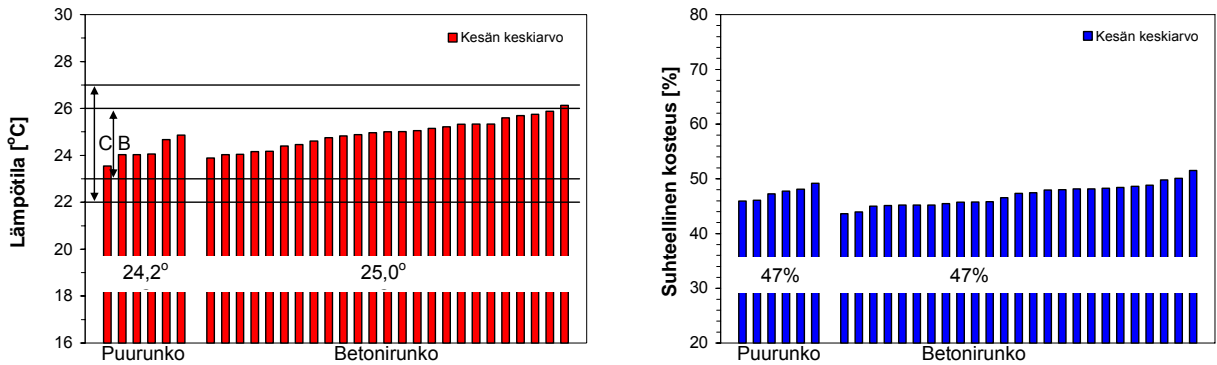
Kuva 2.5.4 Kesäjakson keskimääräisen sisälämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu eri pientalotyypin välillä.

Taulukko 2.5.4 Lämpötilan (T), suhteellisen kosteuden (RH) ja vesihöyrypitoisuuden (v) kesäjaksojen keskiarvot ja niiden keskihajonta (σ) pientaloissa.

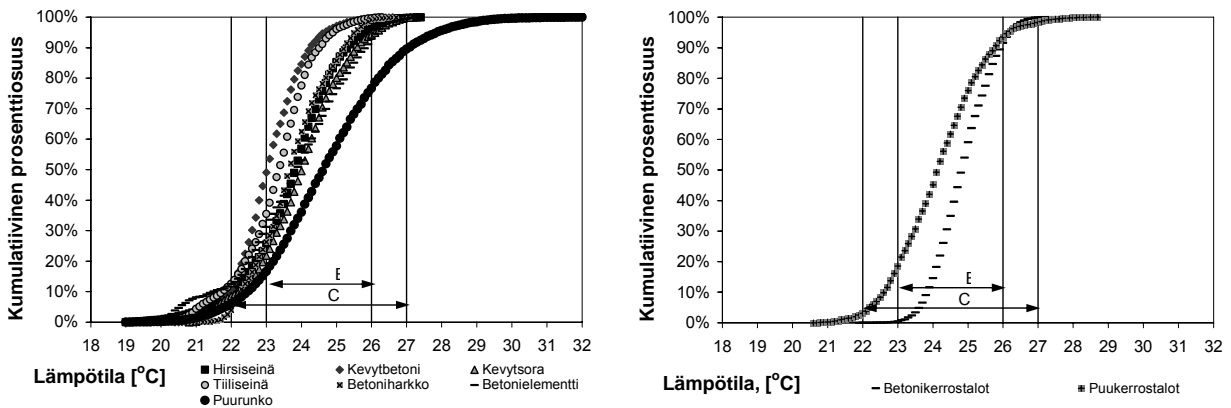
	T, [°C]	σ	RH, [%]	σ	v, [g/m ³]	σ
Hirsitalo	23,8	1,0	51	3	11,0	0,8
Kevytbetonitalo	23,1	0,5	53	4	10,9	0,6
KevytSORAtalo	24,0	1,1	51	3	11,1	0,4
Tiilitalo	23,3	0,9	53	2	11,0	0,5
Betoniharkkotalo	23,8	0,9	52	2	11,1	0,2
Betonielementtitalo	23,9	1,5	49	5	10,6	0,8
Mittaushuoneen ikkunan suunta pohjoiseen	23,5	1,2	51	3	10,9	0,8
Mittaushuoneen ikkunan suunta etelään	23,7	0,8	52	3	11,1	0,4
Kaikki kohteet	23,7	1,0	52	3	11,0	0,6

Kaikkien toisena kesänä mitattujen kerrostaloasuntojen sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot ja niiden vertailu eri talotyypin välillä on esitetty kuvassa 2.5.5. Jokainen pylväs kuvaa yhtä asuntoa.

Kesäaikaisten sisälämpötilojen pysyvyys on esitetty kuvassa 2.5.6. Jokainen viiva kuvaa yhden talotyypin kaikkien talojen tai asuntojen kaikkia sisälämpötiloja. Pientalojen kuvaan (vasen) on liitetty myös ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimusprojektissa (Vinha et al. 2005) mitattujen puurunkoisten pientalojen kesäaikaiset sisälämpötilat. Puurunkoisissa pientaloissa oli kesällä lämpimämpää kuin massiivirunkoisissa taloissa. Toisaalta, tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että mittaus suoritettiin eri vuosina ja puurunkoisia pientaloja mitattaessa myös ulkoilma oli kesällä lämpimämpi.



Kuva 2.5.5 Kesäjakson sisälämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu eri kerrostalotyyppejä välillä.

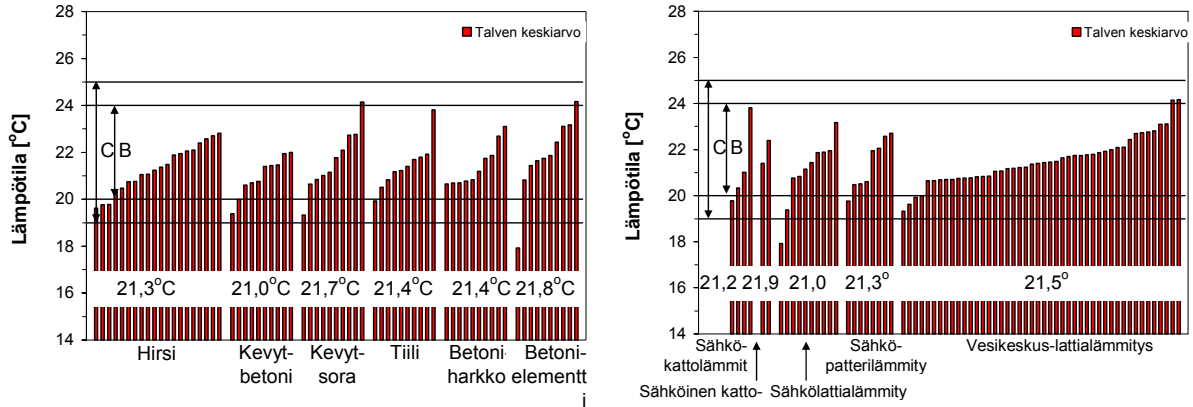


Kuva 2.5.6 Kesäjakson sisälämpötilojen pysyvyys pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).

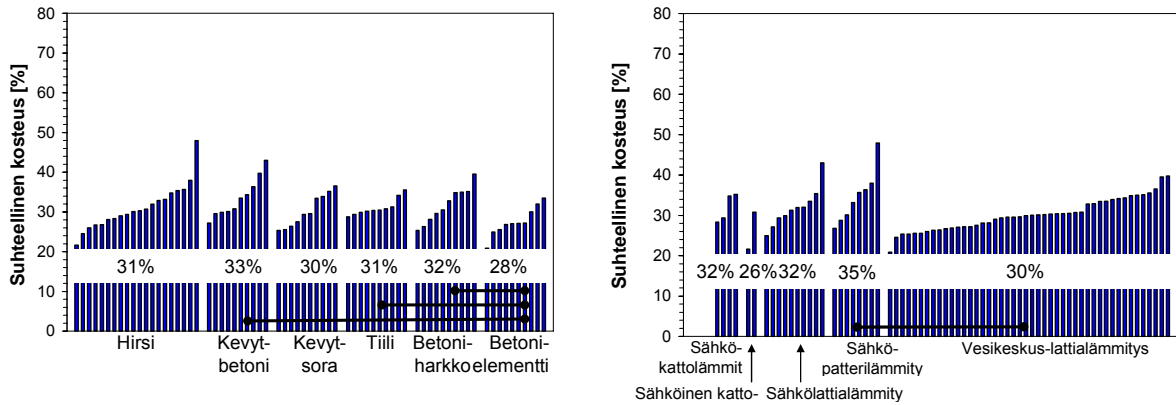
2.5.4.2 Talvijakson lämpötilat ja kosteus

Talvella sisälämpötila vaihteli pientaloissa 15 °C ja 35 °C välillä ja kerrostaloissa 18 °C ja 27 °C välillä. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli pientaloissa 5 % RH ja 73 % RH välillä ja kerrostaloissa 17 % RH ja 63 % RH välillä. Talven sisälämpötilan keskiarvo oli pientaloissa 21,4 °C (taloissa mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 17,9–24,2 °C) ja kerrostaloissa 22,9 °C (asunnoissa mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 20,3–24,9 °C). Suhteellisen kosteuden keskiarvo oli pientaloissa 30 % RH (taloissa mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli 21–48 % RH) ja kerrostaloissa 26 % RH (asunnoissa mitattujen keskiarvojen vaihteluväli oli vastaavasti 20...42 % RH).

Kaikkien pientalojen talviaikaisten sisälämpötilojen vertailu talotyyppejä välillä ja eri lämmitysjärjestelmien välillä on esitetty kuvassa 2.5.7. Kuvassa 2.5.8 on esitetty suhteellisen kosteuden vertailu eri talotyyppejä ja eri lämmitysjärjestelmien välillä. Jokainen pylväs kuvaa yhtä taloa. Talven sisälämpötilan ja -kosteuden keskiarvot ovat esitetty taulukossa 2.5.5.



Kuva 2.5.7 Talvijakson sisälämpötilojen vertailu eri pientalotyyppien välillä (vasen) ja eri lämmitysjärjestelmien välillä (oikea).

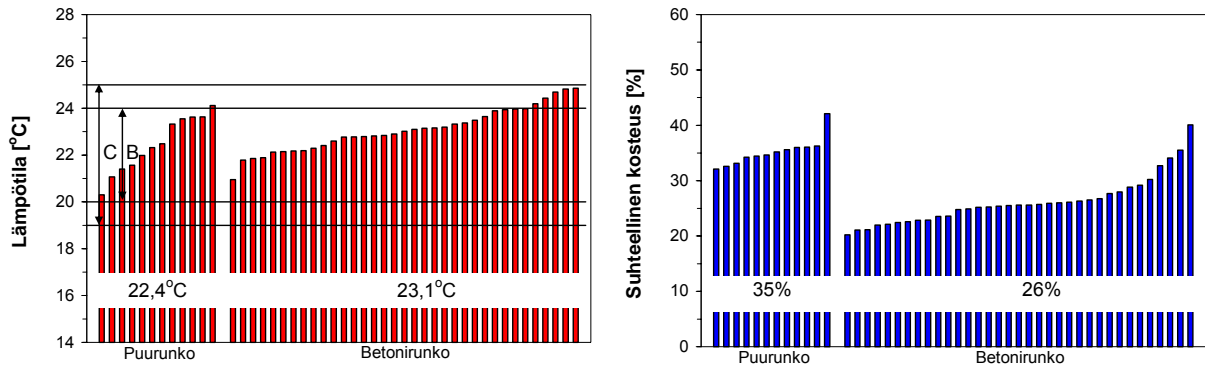


Kuva 2.5.8 Talvijakson sisäilman suhteellisen kosteuden vertailu eri pientalotyyppien välillä (vasen) ja eri lämmitysjärjestelmien välillä (oikea).

Taulukko 2.5.5 Lämpötilan (T), suhteellisen kosteuden (RH) ja vesihöyrypitoisuuden (v) talvijakson keskiarvot ja niiden keskihajonta (σ) pientaloissa.

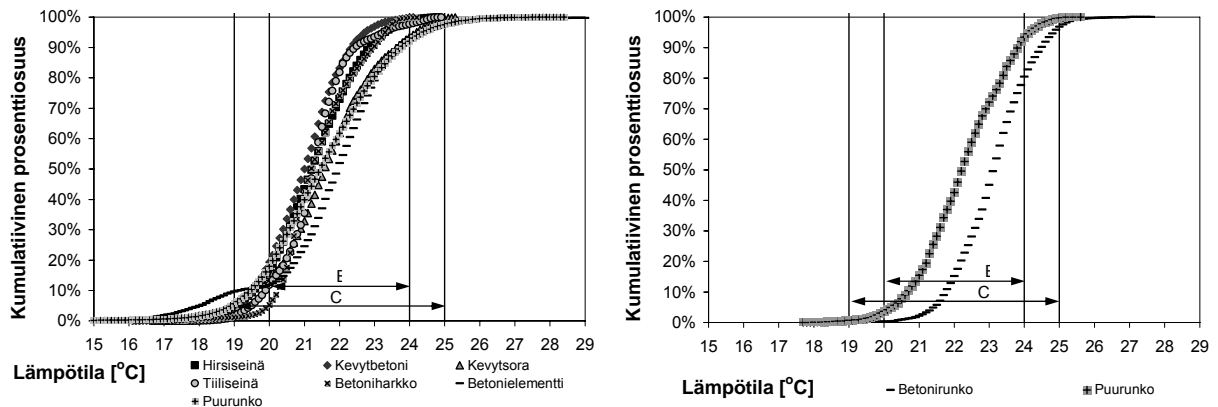
	T, [°C]	σ	RH, [%]	σ	v, [g/m ³]	σ
Hirsitalo	21,3	1,0	31	6	5,8	1,0
Kevytbetonitalo	21,0	0,8	33	5	6,1	0,8
Kevytsoratalo	21,7	1,4	30	4	5,7	0,5
Tiilitalo	21,4	1,0	31	2	5,9	0,5
Betoniharkkotalo	21,4	0,9	32	5	6,0	1,0
Betonielementtitalo	21,8	1,7	28	4	5,3	0,6
Sähköinen kattolämmitys	21,2	1,8	32	4	6,0	0,7
Sähköinen katto- ja lattialämmitys	21,9	0,7	26	6	5,1	1,0
Sähköinen lattialämmitys	21,0	1,5	32	5	5,9	0,7
Sähköinen patterilämmitys	21,3	1,1	35	7	6,5	1,1
Vesikeskus lattialämmitys	21,5	1,0	30	4	5,7	0,7
Kaikki kohteet	21,4	1,1	31	5	5,8	0,8

Kaikkien toisena talvena mitattujen kerrostaloasuntojen sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot ja niiden vertailu eri talotyyppien välillä on esitetty kuvassa 2.5.9. Jokainen pylväs kuvaa yhtä asuntoa.



Kuva 2.5.9 Talvijakson sisälämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu eri kerrostalotyypin välillä.

Talviaikaisten sisälämpötilojen pysyvyys on esitetty kuvassa 2.5.10. Jokainen viiva kuvaa yhden talotyypin kaikkien talojen tai asuntojen kaikkia sisälämpötiloja. Pientalojen kuvaan (vasen) on liitetty myös ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimusprojektissa (Vinha et al. 2005) mitattujen puurunkoisten pientalojen kesäaikaiset sisälämpötilat.

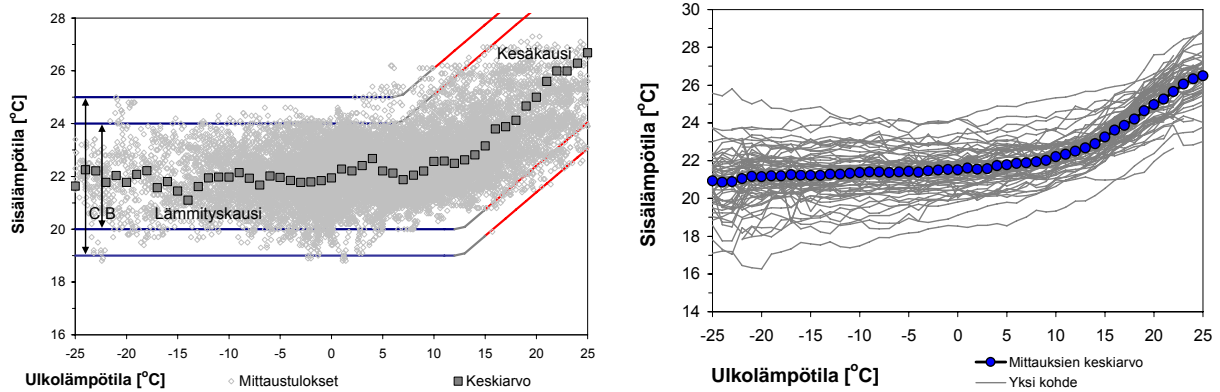


Kuva 2.5.10 Talvijakson sisälämpötilojen pysyvyys pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).

2.5.5 Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkolämpötilasta

2.5.5.1 Sisäilman lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta

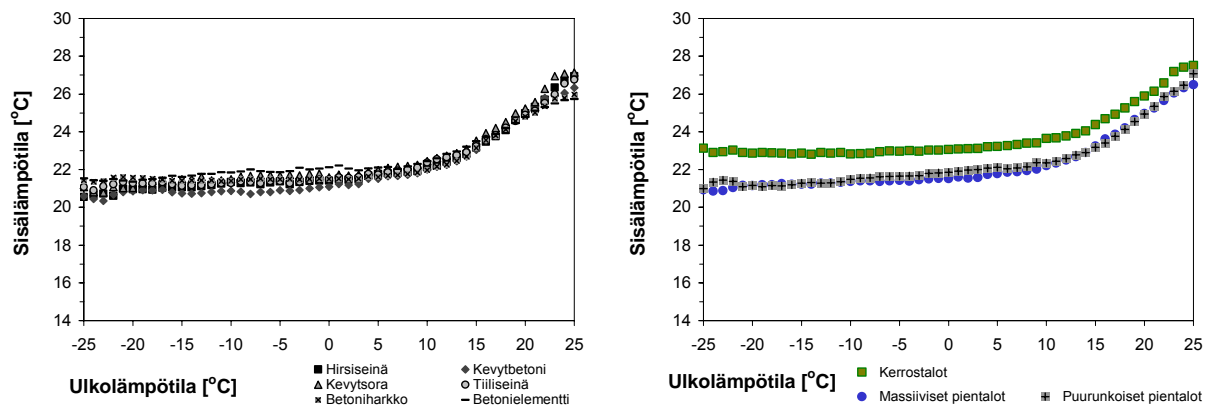
Jokaisen mittauskohteen sisälämpötilat on luokiteltu ulkoilman lämpötilan mukaan käyttämällä ulkolämpötilan yhden asteen porrasta (kuva 2.5.11 vasen). Jokaisen yhden ulkolämpötila-asteen väliin jäävistä sisäilman lämpötiloista on laskettu keskiarvo ja näistä on piirretty yhtenäinen kuvaaja kullekin kohteelle ulkolämpötilan funktiona. Kaikista pientaloista piirretyt kuvaajat ja niiden keskiarvot on esitetty myös kuvaajassa 2.5.11 (oikea).



Kuva 2.5.11 Sisälämpötilojen riippuvuus ulkolämpötilasta esimerkkitalossa (vasen) ja keskimääräisen sisälämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta kaikissa pientaloissa (oikea). Vasemmassa kuvassa on esitetty lisäksi standardin CR 1752 (1998) mukaiset ei-jäähdytetyn sisäilmaston tavoitearvot luokissa B ja C.

Eri seinärakennetyyppien vaikutus keskimääräiseen sisälämpötilaan on erittäin pieni. Kuvassa 2.5.12 (vasen) jokainen viiva kuvaa yhden talotyypin keskimääräisen sisälämpötilan riippuvuutta ulkolämpötilasta. Kuvaan on liitetty myös puurunkoisten pientalojen sisälämpötilat, jotka mitattiin ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimusprojektissa (Vinha et al. 2005). Massiivirakenteisten ja kevytrakenteisten talojen välillä ei myöskään ole eroja.

Kun verrataan pientalojen ja kerrostalojen lämpötiloja, nähdään, että kerrostaloasunnot olivat paljon lämpimämpiä (kuva 2.5.12 oikea).



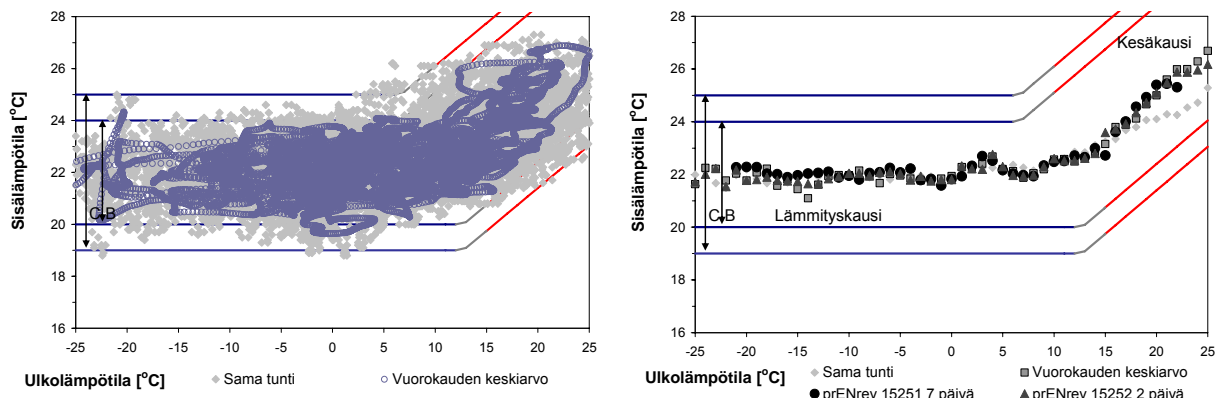
Kuva 2.5.12 Keskimääräisen sisälämpötilan vertailu eri pientalotyypin välillä (vasen) ja keskimääräisen sisälämpötilan vertailu pientalojen ja kerrostalojen välillä (oikea).

Tämä tutkimus tukee puurunkoisten pientalojen mittausten yhteydessä saatua tulosta, jonka mukaan lämmityskauden ja kesäjakson välisenä rajana voidaan pitää ulkoilman vuorokauden keskilämpötilaa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kun ulkoilman vuorokauden keskilämpötila pysyy alle $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, sisälämpötila pysyy pientaloissa keskimäärin $21\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Ulkoilman vuorokauden keskilämpötilan laskiessa voidaan kuitenkin todeta myös pientä sisäilman lämpötilan laskua. Ulkoilman vuorokauden keskilämpötilan noustessa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $25\text{ }^{\circ}\text{C}$:een asti sisälämpötila nousee lähes lineaarisesti $22\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $27\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Kerrostaloissa oli lämpötila keskimäärin $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpimämpi kuin pientaloissa.

Ulkolämpötila on mahdollista laskea erilaisilla tavoilla:

- Käyttämällä sisälämpötilan kanssa saman tunnin ulkolämpötila;
- Käyttämällä SFS-EN 15251 (2007) -standardin laskentakaavaa (kaava 2.5.1; $\alpha = 0.8$) ja 7 edellisen vuorokauden mittaustuloksia
- Käyttämällä SFS-EN 15251 (2007) -standardin laskentakaavaa (kaava 2.5.1; $\alpha = 0.8$) ja 1 edellisen vuorokauden mittaustuloksia
- Käyttämällä edellisen vuorokauden ulkolämpötilan liukuvaa keskiarvoa (SFS-EN 15251 (2007) –standardin laskentakaava; $\alpha = 0$).

Näiden eri laskentatapojen vaikutusta tutkittiin yhdessä esimerkkitalossa ja tulosten vertailu on esitetty kuvassa 2.5.13.

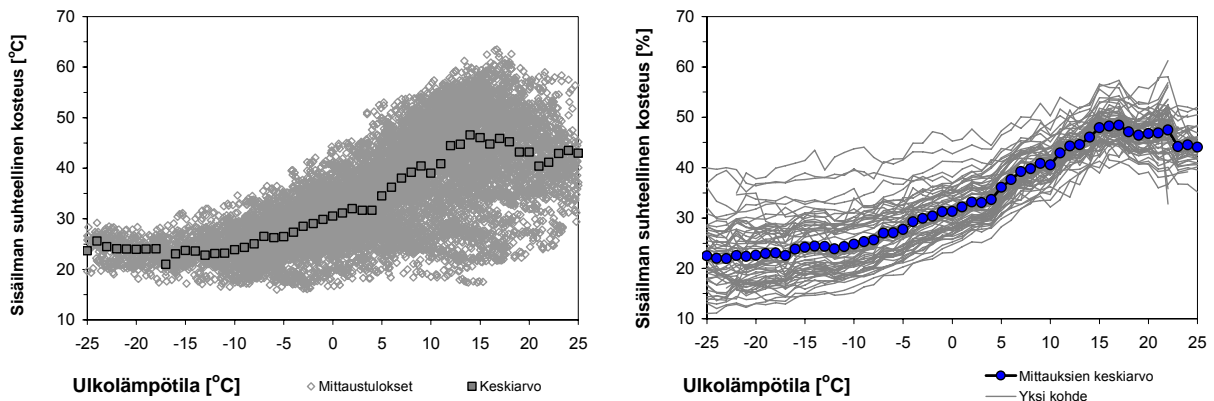


Kuva 2.5.13 Ulkolämpötilan laskentatavan vaikutus sisä- ja ulkolämpötilan riippuvuuteen kaikkien mittaustuloksien vertailussa (vasen) ja keskimääräisten tulosten vertailussa (oikea). Kuvissa on esitetty lisäksi standardin CR 1752 (1998) mukaiset ei-jäähdytetyn sisäilmaston tavoitearvot luokissa B ja C.

Sillä, otetaanko ulkolämpötilan laskentaan mukaan 1, 2 tai 7 päivää, ei ole suurta eroa, vaan sisälämpötilan ja ulkolämpötilan välinen riippuvuus on lähes sama kaikissa tapauksissa. Tämä tulos tukee ulkolämpötilan edellisen vuorokauden liukuvan keskiarvon käyttöä, koska sen laskeminen on helpointa. Jos verrataan mitattuja lämpötiloja mittaustuloksista laskettujen keskiarvojen kanssa, havaitaan eroavaisuuksia ennen kaikkea lämpötilojen huipuissa (kuva 2.5.13 vasen). Mittaustuloksien keskiarvojen käyttäminen eliminoi laskelmista lämpötilahuiput, jolloin ne täyttävät tavoitearvot paremmin.

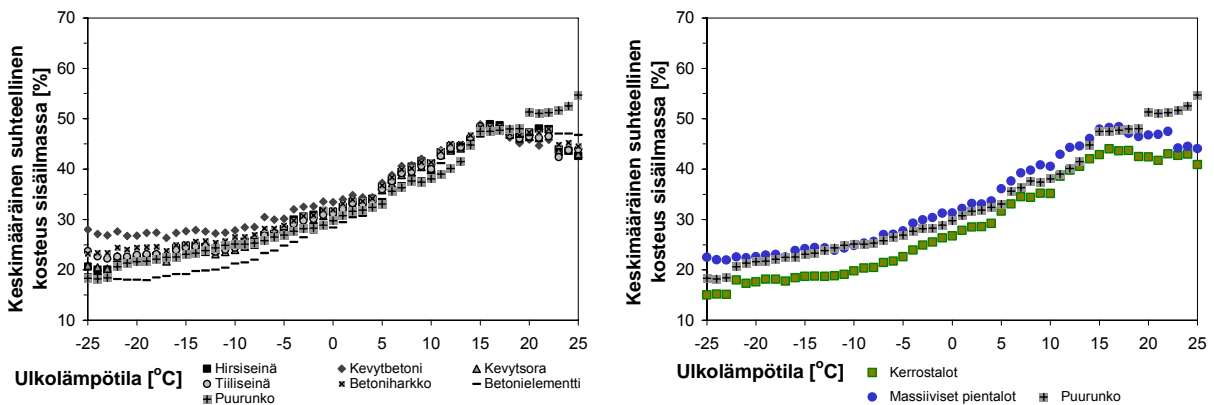
2.5.5.2 Sisäilman suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkolämpötilasta

Jokaisen mittauskohteen sisäilman suhteelliset kosteudet on luokiteltu ulkoilman lämpötilan mukaan käyttämällä ulkolämpötilan yhden asteen porrasta (kuva 2.5.14 vasen). Jokaisen yhden ulkolämpötila-asteen väliin jäävistä sisäilman suhteellisista kosteuksista on laskettu keskiarvo ja näistä on piirretty yhtenäinen kuvaaja kullekin kohteelle ulkolämpötilan funktiona. Kaikista pientaloista piirretyt kuvaajat ja niiden keskiarvot on esitetty myös kuvassa 2.5.14 (oikea).



Kuva 2.5.14 Sisäilman suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkolämpötilasta esimerkkitalossa (vasen) ja sisäilman keskimääräisen suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkolämpötilasta kaikissa pientaloissa (oikea).

Eri seinärakennetyyppien vaikutus sisäilman keskimääräiseen suhteelliseen kosteuteen on esitetty kuvassa 2.5.15 vasemmalla. Pientalojen ja kerrostalojen sisäilman suhteellisen kosteuden vertailu on esitetty kuvassa 2.5.15 oikealla. Korkeammasta lämpötilasta johtuen kerrostaloissa oli matalampi suhteellinen kosteus. Kerrostaloissa sisäilman suhteellinen kosteus laski alle 20 % RH, kun ulkolämpötila oli kylmempi kuin $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pientaloissa sisäilman keskimääräinen suhteellinen kosteus pysyi yleensä korkeammalla kuin 20 % RH.

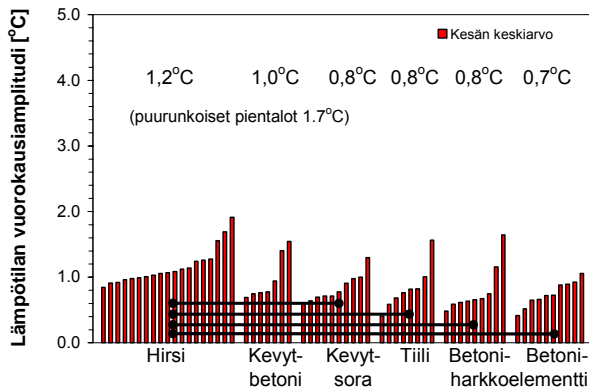


Kuva 2.5.15 Sisäilman keskimääräisen suhteellisen kosteuden vertailu eri pientalotyyppeillä (vasen) ja sisäilman keskimääräisen suhteellisen kosteuden vertailu eri pientalojen ja kerrostalojen välillä (oikea).

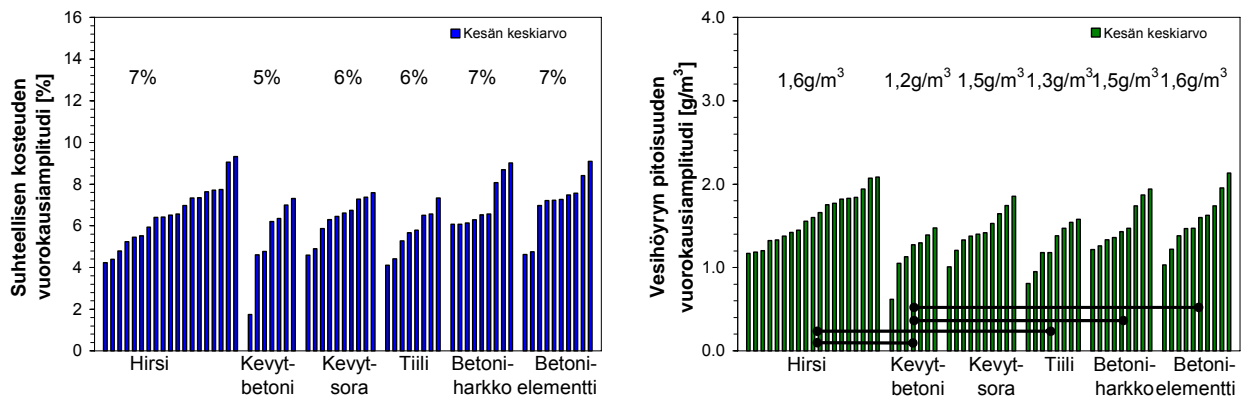
2.5.6 Sisäolosuhteiden vuorokausiamplitudi

Sisäilman lämpötilan ja kosteuden vaihtelua ja sisäilmastotekijöiden pysyvyyttä pientalotyypeittäin tutkittiin myös vuorokausitasolla. Vuorokausiamplitudi laskettiin vuorokauden maksimi- ja minimimittaus tulosten erosta. Vuorokausiamplitudista laskettiin erikseen keskiarvo kullekin kohteelle sekä tarkastelluille kesä- että talvijaksoille. Kuvissa 2.5.16 ja 2.5.17 on vertailtu kohteiden lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja vesihöyrypitoisuuden vuorokausiamplitudien tasoa kesäkaudella. Eri talotyyppeillä on piirretty viivat, mikäli ero ko. talotyyppeillä on tilastollisesti merkitsevä. Kesäajalla kohteiden lämpötilan vuorokausiamplitudin keskiarvo vaihteli välillä $0,5\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hirsitaloissa oli keskimäärin isompi lämpötilavaihtelu kuin muissa talotyypeissä. Tämä on selitettävissä hirsitalojen kivitaloja pienemmällä termisellä massalla. Aiemmassa tutkimuksessa mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa kesäajan lämpötilavaihtelu oli vielä suurempaa, koska näissä

taloissa vaipan terminen massa oli vielä pienempi. Näitä tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että kyseessä oli myös eri mittausvuosi (ks. myös luku 2.5.4). Suhteellisen kosteuden tasoissa ei ollut merkittävää eroa talotyyppien välillä. Vesihöyrypitoisuuden vaihtelu oli kevytbetonitaloissa keskimäärin tilastollisesti merkittävästi pienempää ja hirsitaloissa vastaavasti keskimäärin merkittävästi suurempaa kuin muutamissa muissa talotyypeissä.



Kuva 2.5.16 Sisälämpötilan vuorokausiamplitudin keskiarvo kesäjaksolla eri pientalotyypeissä.

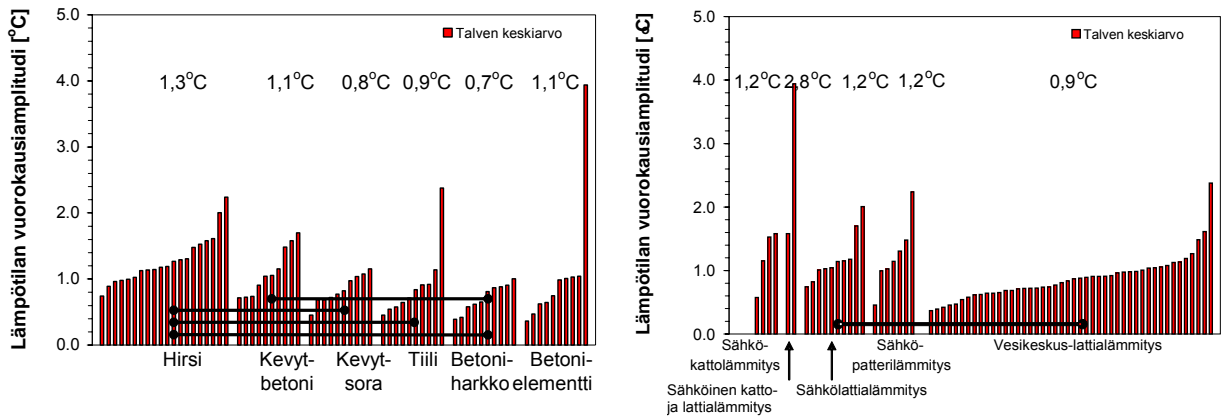


Kuva 2.5.17 Suhteellisen kosteuden (vasen) ja vesihöyrypitoisuuden (oikea) vuorokausiamplitudi kesäjaksolla eri pientalotyypeissä.

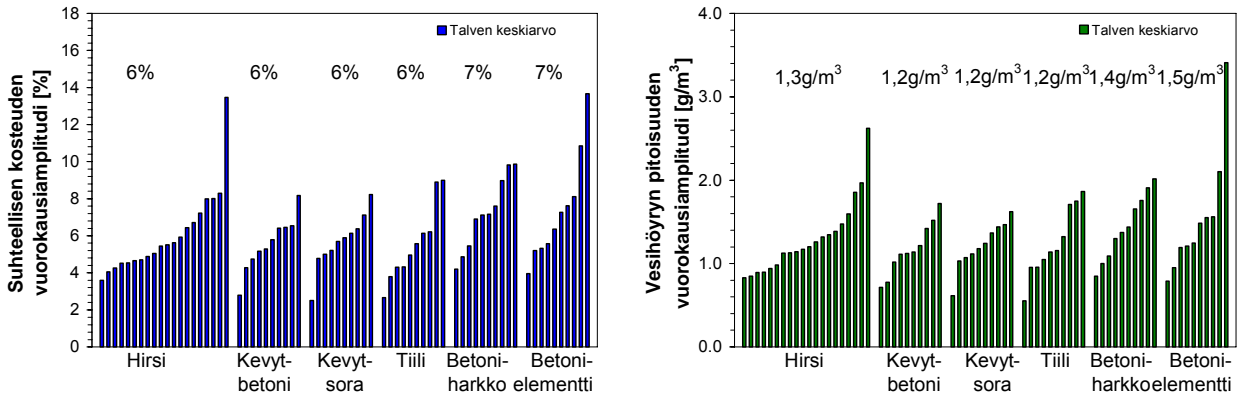
Talvijaksolla lämpötilan vuorokausiamplitudin vertailu eri pientalotyypeissä on esitetty kuvassa 2.5.18 (vasen). Myös talvikaudella hirsitaloissa lämpötilavaihtelu oli keskimäärin muita taloja suurempaa. Myös kevytbetonitaloissa keskimääräinen lämpötilan vuorokausiamplitudi oli korkeampi kuin betoniharkkotaloissa. Kuvassa 2.5.18 (oikea) on vertailtu koekohteiden talven lämpötilan vuorokausivaihtelua eri lämmönjakotapojen välillä. Kohteissa, joissa oli sähköinen lattialämmitys, lämpötilavaihtelu oli merkittävästi suurempaa kuin kohteissa, joissa oli vesikeskuslämmitteinen lattialämmitys. Suhteellisen kosteuden ja vesihöyrypitoisuuden tasoissa talotyyppien välillä ei ollut merkittäviä eroja (kuva 2.5.19). Tulosten perusteella lämpötilan vaihtelulla on suurempi merkitys sisäilman suhteelliseen kosteuteen kuin seinärakenteilla. Kohteiden sisustuksella ja ikkunatuuletuksella on myös todennäköisesti vaikutusta sisäilman olosuhteisiin.

Taulukossa 2.5.6 on esitetty yhteenveto lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja vesihöyrypitoisuuden vuorokausiamplitudista eri pientalotyypeissä ja kerrostaloasunnoissa. Taulukossa on tarkasteltu myös ikkunan suuntauksen ja lämmönjakotavan vaikutusta

vuorokausiamplitudiin. Kerrostaloasuntojen lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja vesihöyrypitoisuuden vuorokausiamplitudit eivät poikenneet merkittävästi pientaloista, lukuun ottamatta talvikauden lämpötiloja, joiden vaihtelu kerrostaloissa oli pienempi.



Kuva 2.5.18 Sisälämpötilan vuorokausiamplitudin keskiarvo talvijaksolla pientalotyypeittäin (vasen) ja lämmönjakotavoittain vertailtuna (oikea).



Kuva 2.5.19 Suhteellisen kosteuden (vasen) ja vesihöyrypitoisuuden (oikea) vuorokausiamplitudi talvijaksolla eri pientalotyypeillä.

Taulukko 2.5.6 Lämpötilan (T), suhteellisen kosteuden (RH) ja vesihöyrypitoisuuden (v) vuorokausiamplitudien keskiarvot sekä kesä- että talvijaksolla pientaloissa ja kerrostaloasunnoissa.

	ΔT , [°C]		ΔRH , [%]		Δv , [g/m ³]	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Hirsitalo	1,2	1,3	7	6	1,6	1,3
Kevytbetonitalo	1,0	1,1	5	6	1,2	1,2
KevytSORATALO	0,8	0,8	6	6	1,5	1,2
Tiilitalo	0,8	0,9	6	6	1,3	1,2
Betoniharkkotalo	0,8	0,7	7	7	1,5	1,4
Betonielementtitalo	0,7	1,1	7	7	1,6	1,5
Mittaushuoneen ikkunan suunta pohjoiseen	1,0		6		1,5	
Mittaushuoneen ikkunan suunta etelään	0,8		6		1,4	
Sähköinen kattolämmitys		1,2		5		1,2
Sähköinen katto- ja lattialämmitys		2,8		5		2,7
Sähköinen lattialämmitys		1,2		7		1,4
Sähköinen patterilämmitys		1,2		7		1,3
Vesikeskus lattialämmitys		0,9		6		1,2
Kaikki pientalot	0,9	1,0	6	6	1,5	1,3
Kaikki kerrostaloasunnot	0,9	0,7	7	6	1,6	1,4

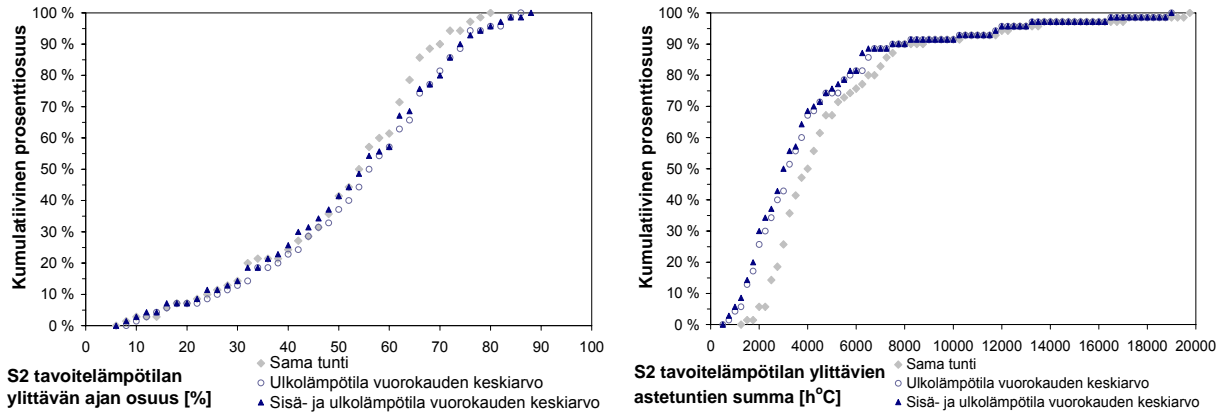
2.5.7 Tulosten tarkastelu

Sisäilmaston olosuhteita on verrattu eri pientalotyyppeihin ja kerrostaloasuntojen välillä. Koekohteet valittiin tutkimukseen siten, että erilaiset vaipparakenteet olisivat riittävän edustettuja. Muita tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa sisäilmasto-olosuhteisiin ei kontrolloitu. Näin ollen esimerkiksi talojen arkkitehtuuri, suuntaus ja ympäristö olivat erilaiset jokaisessa tapauksessa. Kesäaikaan lämpötiloihin vaikuttavat myös mm. ikkunoiden tyyppi, koko ja suuntaus. Lämpötilaa ja kosteutta mittaavat dataloggerit oli asetettu makuuhuoneeseen, joten näiden huoneiden ilmansuunta vaikuttaa myös tuloksiin. Lisäksi asukkaiden asumistottumukset vaikuttavat tunnetusti mm. lämpötilan tasoon ja energiankulutukseen. Koska näiden tekijöiden kannalta tarkasteltuna talot valittiin tutkimukseen satunnaisotoksena, oletetaan niiden vaikutuksen tuloksiin jäävän pieneksi.

Keskimääräinen sisälämpötila mitatulla kesäjaksolla oli massiivipientaloissa matalampi 23,7 °C (taloista mitattujen kesäjaksos keskiarvojen vaihteluväli oli 20,7–26,0 °C) kuin puurunkoisissa pientaloissa (Vinha et al. 2005) 24,8 °C (tiloista mitattujen kesäjaksos keskiarvojen vaihteluväli oli 22,2–28,5 °C). Ero johtui ennen kaikkea lämpimämmästä ulkoilmasta, sillä sisä- ja ulkoilman välisissä lämpötilaeroissa ei havaittu merkittäviä eroja.

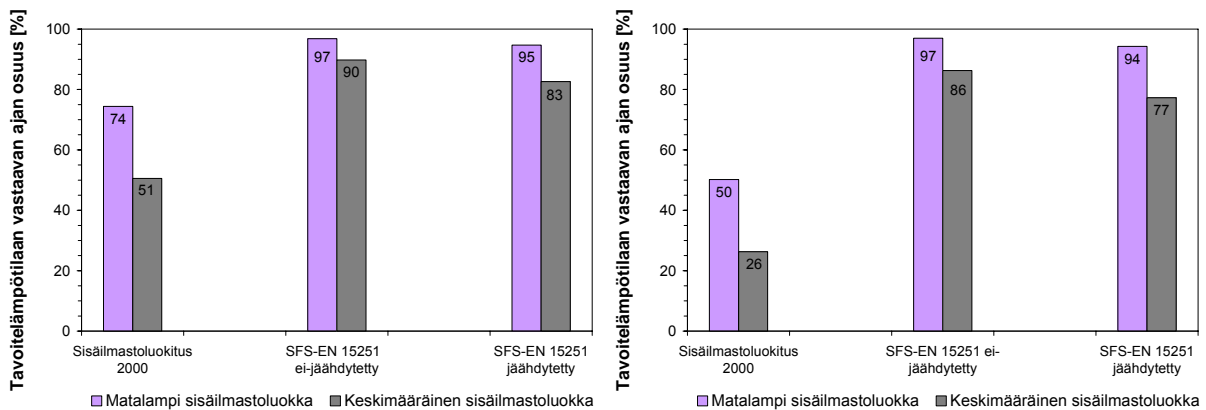
Keskimääräinen sisälämpötila oli kerrostaloissa korkeampi kuin pientaloissa (t-testi, $p < 0,00001$). Samansuuntainen tulos saatiin Helsingin alueella 155 omakotitalossa ja 87 kerrostalossa tehdyissä mittauksissa (Ruotsalainen et al. 1992). Kyseessä olevassa tutkimuksessa sisälämpötila oli kerrostaloissa (22,2 °C) merkittävästi korkeampi (t-testi, $p < 0,01$), kuin omakotitaloissa (21,7 °C). Eri ilmanvaihtojärjestelmien välillä erot olivat pienemmät.

Ulkolämpötilan keskiarvojen käytön vaikutusta sisälämpötilan tavoitearvojen saavuttamiseen tarkasteltiin vertaamalla pientalojen mittaustuloksia ja Sisäilmastoluokitus 2000 (2001) sisäilmastoluokan S2 tavoitearvoja (kuva 2.5.20). Vuorokauden keskiarvo laskettiin joko ulkolämpötilasta tai ulko- ja sisälämpötilasta kaavan 2.5.1 avulla. Kuvasta 2.5.20 nähdään, että lämpötilan keskiarvojen käyttö vaikuttaa sekä sisälämpötilan tavoitearvojen saavuttamiseen (kuva 2.5.20 vasen) että tavoitearvojen ylittävien astetuntien summaan (kuva 2.5.20 oikea). Tavoitearvojen ylittävien astetuntien summaan vaikutus on isompi.



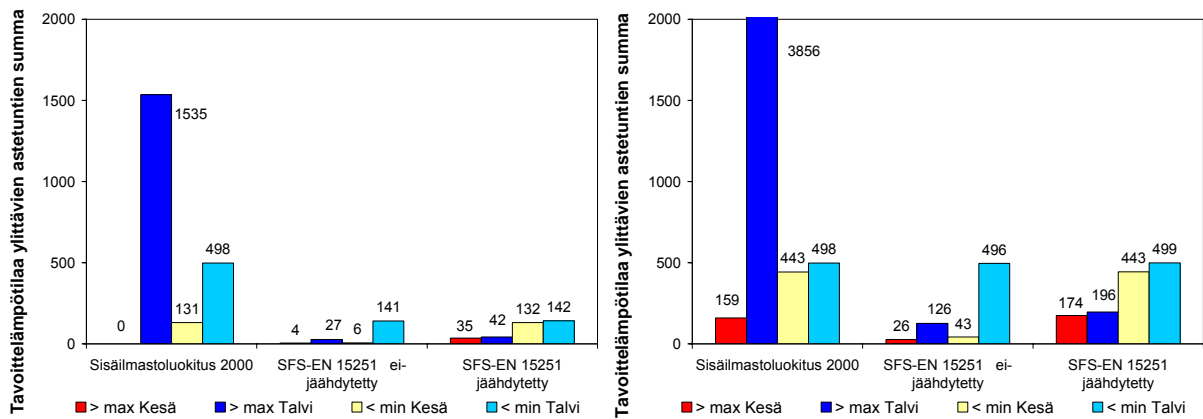
Kuva 2.5.20 Ulkolämpötilan laskentatavan vaikutussisäilman tavoitelämpötilan ylittävän ajan osuuteen (vasen) ja tavoitelämpötilojen ylittävien astetuntien summaan (oikea). Tavoitelämpötiloina on käytetty Sisäilmastoluokitus 2000 (2001) sisäilmastoluokan S2 tavoitearvoja.

Mitattuja lämpötiloja verrattiin myös erilaisten sisäilmastoluokitusten alimman ja keskimmäisen sisäilmastoluokan tavoitearvoihin (ks. kuva 2.5.3). Kuvassa 2.5.21 on esitetty keskimääräinen prosenttiosuus ajasta, jolloin mitattu sisälämpötila pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea) vastasi eri sisäilmastoluokitusten tavoitelämpötiloja.

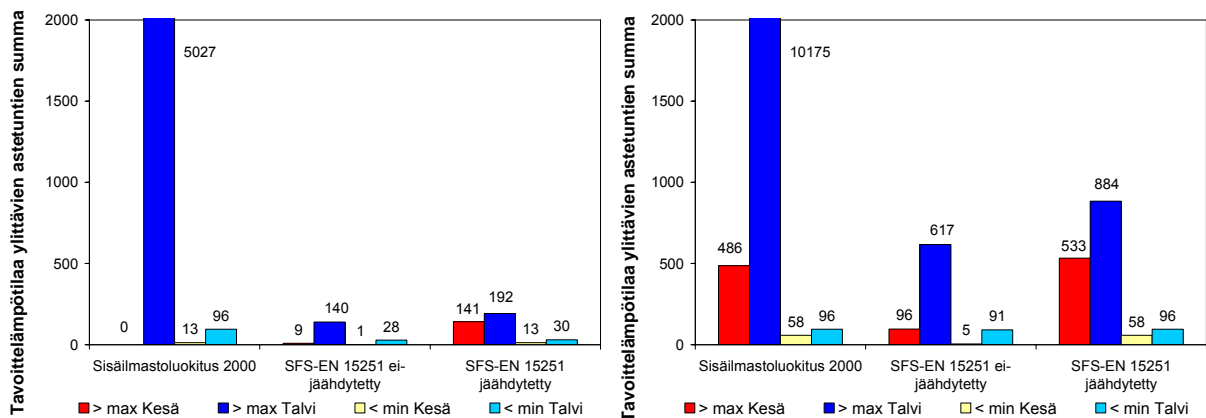


Kuva 2.5.21 Tavoitelämpötilaa vastaavan ajan osuus pientaloissa (vasen) ja kerrostaloissa (oikea).

Kuvissa 2.5.22 (pientalot) ja 2.5.23 (kerrostalot) on esitetty keskiarvot eri sisäilmastoluokitusten alimman (vasen) ja keskimmäisen (oikea) sisäilmastoluokan tavoitelämpötilat ylittävien ja alittavien astetuntien summista.



Kuva 2.5.22 Eri sisäilmastoluokitusten alimman (vasen) ja keskimmäisen (oikea) sisäilmastoluokan tavoitelämpötilat ylittävien ja alittavien asetuntien summien keskiarvot pientaloissa.



Kuva 2.5.23 Eri sisäilmastoluokitusten alimman (vasen) ja keskimmäisen (oikea) sisäilmastoluokan tavoitelämpötilat ylittävien ja alittavien asetuntien summien keskiarvot kerrostaloissa.

Kuvista nähdään, että asunnoissa oli liian korkeat lämpötilat ennen kaikkea talvella. Koska asuinnoissa ei yleensä ole jäähdytystä ja niissä on mahdollista avata ikkunoita ja valita vaateetusta, voidaan standardin SFS-EN 15251 (2007) mukaan hyväksyä kesällä sitä korkeampi sisälämpötila mitä korkeampi on ulkolämpötila. Tämän kriteerin mukaan korkeat lämpötilat eivät ole kesällä ongelmallisia pien- ja kerrostaloissa, koska keskimääräiset tavoitelämpötilat ylittävien asetuntien summa jää alle 100 asetuntia. Toimistorakennuksille on suositeltu painotettujen tavoitelämpötilat ylittävien asetuntien summan raja-arvoksi 100–150 tuntia vuodessa (Olesen & Parsons 2002, Van der Linden et al. 2002). Asunnoissa voidaan yleensä hyväksyä suurempiakin ylityksiä, esimerkiksi kesällä 150 asetuntia.

2.6 Sisäilman kosteuslisä ja kosteuden tuotto

2.6.1 Mittaukset

Kosteuslisän ja kosteuden tuoton tarkastelussa oli mukana 70 pientaloa ja 49 kerrostaloasuntoa. Kohteiden jakauma on esitetty taulukossa 2.6.1. Mittausajat vaihtelivat kuudesta kuukaudesta 28 kuukauteen.

Taulukko 2.6.1 Koekohteiden jakauma sisäilman kosteuslisän ja kosteuden tuoton tarkasteluissa.

Pientaloja		Kerrostaloja	
Hirsi	20	Puu	15
Kevytbetoni	10	Betoni	34
Betoniharkko	10	Yhteensä	49
Tiili	10		
Kevytsorabetoniharkko	10		
Betonielementti	10		
Yhteensä	70		

Pientalot ja kerrostaloasunnot erosivat toisistaan mm. niiden ilmanvaihdon ja asumistiheyden perusteella. Pientaloissa asumistiheys oli pienempi. Vaikka ilmanvaihto tilavuutta ja lattia-pinta-alaa kohti kerrostaloasunnoissa oli suurempi kuin pientaloissa, oli kokonaisilmanvaihto asukasta kohti pien- ja kerrostaloissa ($l/(s \cdot asukas)$) keskimäärin sama. Taulukossa 2.6.2 on esitetty pientalojen ja kerrostaloasuntojen ominaisuuksia.

Taulukko 2.6.2 Kosteuslisätarkastelussa mukana olleiden pien- ja kerrostalokohteiden ominaisuuksia.

	Pientalot		Kerrostaloasunnot	
	Keskiarvo	Mediaani	Keskiarvo	Mediaani
Asukkaiden lukumäärä [kpl]	3,4	4	1,8	2
Asumistiheys [$m^2/asukas$]	61	50	44	39
Ilmanvaihto [litraa/h]	0,38	0,36	0,53	0,52
Ilmanvaihto [litraa/s]	53,0	49,8	28,6	25,7
Ilmanvaihto [litraa/(s·asukas)]	17,2	15,7	17,6	15,9
Ilmanvaihto [litraa/(s· m^2)]	0,29	0,28	0,38	0,37
Ilmavuotoluku n_{50} [1/h]	3,4	2,6	1,6	1,0

Sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin paristokäyttöisillä Comark Dilligence EV (N2003 ja N2013) dataloggereilla. Loggereiden tarkkuus on $\pm 0,5$ °C lämpötilan osalta ja ± 3 % RH kosteuden osalta. Loggerit tallensivat lukemat tunnin välein. Mittausloggeri sijaitsi jokaisessa kohteessa vanhempien makuuhuoneessa. Loggeri asennettiin huoneessa edustavaan paikkaan väliseinälle, jotta ulkoseinien pintalämpötila ei olisi vaikuttanut mittaustuloksiin.

Ulkoilman olosuhteina laskennassa on käytetty Ilmatieteen laitoksen lämpötila- ja RH-arvoja joko Helsingin, Tampereen, Hämeenlinnan, Jokioisten, Lahden tai Oulun mittauspisteessä riippuen siitä, mikä niistä sijaitsi lähinnä mitattavaa kohdetta.

2.6.2 Kosteuskuormien määrittäminen

Sisäilman vesihöyrynpitoisuus laskettiin loggereista saaduista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoista. Ulkoilman vesihöyrynpitoisuus laskettiin Ilmatieteen laitokselta saadusta datasta. Vesihöyrynpitoisuus laskettiin standardissa EN ISO 13788 (2001) annetuilla kaavoilla. Sisäilman kosteuslisä Δv [g/m^3] saatiin jokaisen tunnin sisä- ja ulkoilman vesihöyrynpitoisuuksien erotuksesta. Erilaisten hetkellisten häiriötekijöiden vaikutukset eliminoitiin laskemalla tunnin kosteuslisän tuloksista viikon liukuvat keskiarvot vastaavalla periaatteella, jota käytettiin aiemmin puurunkoisten pientalojen tarkasteluissa (Vinha et al. 2005)

Viikon keskiarvojen käyttö laskennassa on perusteltua, koska vaipparakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on tärkeämpää määrittää pidemmällä aikavälillä vaikuttavat kosteuslisät, kuin niiden hetkelliset arvot. Viikon tarkastelujakso myös kuvaa hyvin tyypillistä asumisen sykliä.

Kansainvälisen energia-agentuuri IEA:n julkaisussa (Sanders 1996) on annettu suositus, että kosteusteknisessä tarkastelussa olosuhteiden mitoitusarvojen valinnassa tulisi mitoituskriteerinä käyttää 10 % kriittisyystasoa. Tämä tarkoittaa sitä, että enintään 10 % tapauksista ovat valittua tasoa kriittisempiä ja 90 % tapauksista ovat vähemmän kriittisiä. Esimerkiksi rakenteiden kantavuuden mitoittamiseen verrattuna alhaisemman kriittisyystason käyttöä on perusteltu ensisijaisesti sillä, että rakennusfysikaaliset vauriot eivät aiheuta niin suuria vaurioita ihmisille kuin rakenteiden kantokyvyn pettäminen.

Eri talotyyppien vertailussa kylmä jakso (ulkoilman lämpötilan viikkokeskiarvo ≤ 5 °C) on analysoitu erikseen muista tuloksista (ulkoilman lämpötilan viikkokeskiarvo > 5 °C). Kosteuslisän ja ulkoilman lämpötilan välisen riippuvuuden tarkastelussa ja kosteuslisän mitoitusarvon määrittämisessä kosteuslisän tulokset jaoteltiin ulkoilman lämpötilan viikkokeskiarvon mukaan 1 °C tarkkuudella. Tästä jakaumasta selvitettiin 10 % kriittisyystaso siten, että tarkastelujoukoksi valittiin kokeessa mukana olleiden kohteiden lukumäärä. Jokaisesta kohteesta otettiin huomioon jokaista ulkoilman lämpötilan viikkokeskiarvoa vastaava kosteuslisän viikkokeskiarvojen maksimiarvo. Tästä kaikkien makuuhuoneiden kosteuslisän maksimiarvoista laskettiin ylempi 10 % kriittisyystaso jokaiselle ulkoilman lämpötilalle.

Kosteuslisän ja ilmanvaihdon tilavuusvirran tuloksista laskettiin koekohteiden kosteustuotto, G [$\text{kg}/\text{päivä}$], kaavalla 2.6.1.

$$G = \dot{V}_d \Delta v \quad (2.6.1)$$

missä

Δv kosteuslisä [kg/m^3]

\dot{V}_d anemometrillä mitattu ilmanvaihdon tilavuusvirta [$\text{m}^3/\text{päivä}$]

Kosteustuotto laskettiin kolmelle talvikuukaudelle (joulukuu, tammikuu, helmikuu). Kesäaikaista ilmanvaihdon tilavuusvirtaa ei tiedetä tarkasti, koska se riippuu merkittävästi mm. ikkunatuuleuksesta.

2.6.3 Tulokset

2.6.3.1 Kosteuslisän vertailu eri jakaumaryhmien välillä

Pientalojen kosteuslisän vertailu eri talotyyppien välillä on esitetty taulukossa 2.6.3 ja kerrostaloasuntojen vastaava vertailu taulukossa 2.6.4. Keskimääräinen kosteuslisä pientaloilla talviolosuhteissa ($\leq 5\text{ °C}$) oli $+1,9\text{ g/m}^3$ ja muuna aikana ($> 5\text{ °C}$) $+0,6\text{ g/m}^3$. Keskimääräinen kosteuslisä kerrostaloasunnoissa talviolosuhteissa ($\leq 5\text{ °C}$) oli $+1,4\text{ g/m}^3$ ja muuna aikana ($> 5\text{ °C}$) $+0,3\text{ g/m}^3$. Runkomateriaalin lisäksi kohteet on jaoteltu esim. ilmanvaihdon ja asumistiheyden perusteella. On huomattava, että kaikista kohteista ei ollut saatavilla kaikkia tietoja (esim. asukkaiden lukumäärä), minkä vuoksi kohteiden määrä ei ole kaikissa vertailuissa sama kuin tutkittujen talojen kokonaismäärä.

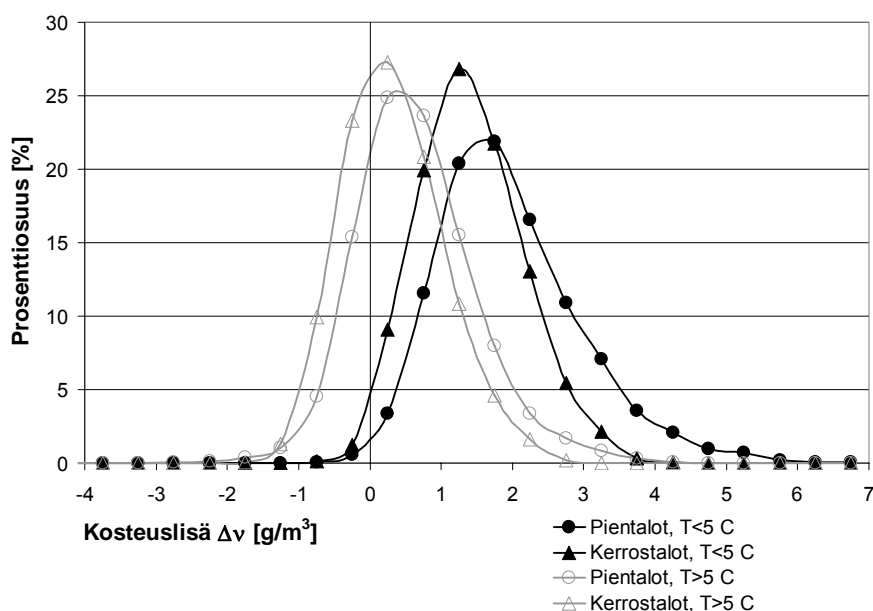
Taulukko 2.6.3 Pientalojen keskimääräinen sisäilman kosteuslisä talviolosuhteissa ($\leq 5\text{ °C}$) ja muuna aikana ($> 5\text{ °C}$).

	Kosteuslisän viikon keskiarvo [g/ m^3]	
	$T_{\text{ulko}} \leq 5\text{ °C}$	$T_{\text{ulko}} > 5\text{ °C}$
Kaikki pientalot (70 taloa)	+1,9	+0,6
Kivitalot (50)	+1,9	+0,6
Hirsitalot (20)	+1,9	+0,7
Kevytbetoniharkko (10)	+2,2	+0,6
Kevytsorabetoniharkko (10)	+1,9	+0,7
Tiili (10)	+2,0	+0,7
Betoniharkko (10)	+1,9	+0,6
Betonielementti (10)	+1,5	+0,4
≤ 3 asukasta taloa kohti (32)	+1,9	+0,6
> 3 asukasta taloa kohti (38)	+1,9	+0,6
Asumistiheys $\leq 50\text{ m}^2/\text{asukas}$ (35)	+2,0	+0,7
Asumistiheys $> 50\text{ m}^2/\text{asukas}$ (35)	+1,8	+0,5
Ilmanvaihto $\leq 0,4\text{ l/h}$ (56)	+1,9	+0,6
Ilmanvaihto $> 0,4\text{ l/h}$ (12)	+1,9	+0,6
Ilmanvaihto $\leq 15\text{ l/(s}\cdot\text{asukas)}$ (30)	+2,1	+0,7
Ilmanvaihto $> 15\text{ l/(s}\cdot\text{asukas)}$ (38)	+1,8	+0,5
Ilmanvaihto $\leq 0,3\text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ (39)	+1,9	+0,6
Ilmanvaihto $> 0,3\text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ (29)	+1,9	+0,6
Ilmavuotoluku $n_{50} \leq 3\text{ l/h}$ (42)	+2,0	+0,6
Ilmavuotoluku $n_{50} > 3\text{ l/h}$ (28)	+1,8	+0,6

Taulukko 2.6.4 Kerrostalojen keskimääräinen sisäilman kosteuslisä talviolosuhteissa ($\leq 5\text{ °C}$) ja muuna aikana ($> 5\text{ °C}$).

	Kosteuslisän viikon keskiarvo [g/m^3]	
	$T_{\text{ulko}} \leq 5\text{ °C}$	$T_{\text{ulko}} > 5\text{ °C}$
Kaikki kerrostalot (49 asuntoa)	+1,4	+0,3
Betonirakenteiset (34)	+1,4	+0,3
Puurakenteiset (15)	+1,5	+0,3
1 asukas asuntoa kohti (14)	+1,5	+0,4
> 1 asukas asuntoa kohti (29)	+1,3	+0,2
Asumistiheys $\leq 40\text{ m}^2/\text{asukas}$ (27)	+1,5	+0,3
Asumistiheys $> 40\text{ m}^2/\text{asukas}$ (16)	+1,1	+0,2
Ilmanvaihto $\leq 0,5\text{ l/h}$ (18)	+1,7	+0,5
Ilmanvaihto $> 0,5\text{ l/h}$ (27)	+1,2	+0,3
Ilmanvaihto $\leq 15\text{ l}/(\text{s}\cdot\text{asukas})$ (16)	+1,6	+0,5
Ilmanvaihto $> 15\text{ l}/(\text{s}\cdot\text{asukas})$ (23)	+1,2	+0,2
Ilmanvaihto $\leq 0,4\text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ (24)	+1,6	+0,5
Ilmanvaihto $> 0,4\text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ (21)	+1,2	+0,2
Ilmavuotoluku $n_{50} \leq 1\text{ l/h}$ (25)	+1,4	+0,3
Ilmavuotoluku $n_{50} > 1\text{ l/h}$ (24)	+1,4	+0,3

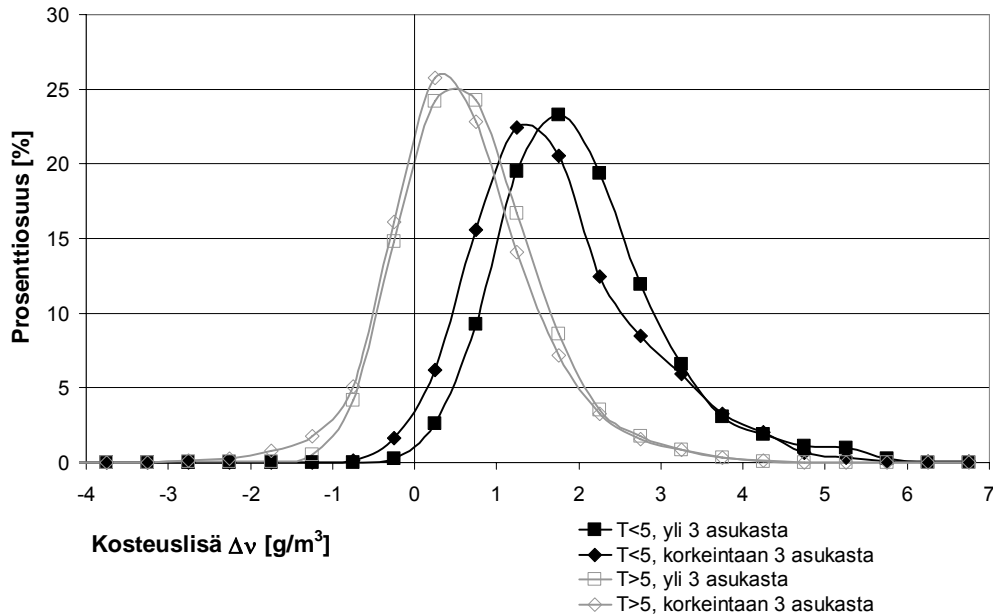
Kuvassa 2.6.1 on vertailtu kosteuslisän viikkokeskiarvojen jakaumaa pientaloissa ja kerrostaloissa talviolosuhteissa ja muuna aikana. Kuvasta nähdään, että pientaloissa kosteuslisä oli korkeampi kuin kerrostaloissa. Osasyynä on oletettavasti pientalojen kerrostaloja pienempi ilmanvaihto ($1/\text{h}$ ja $l/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$).



Kuva 2.6.1 Sisäilman kosteuslisän jakauma pientaloissa ja kerrostaloissa talviolosuhteissa (musta viiva) ja muuna aikana (harmaa viiva).

Taulukoiden 2.6.3 ja 2.6.4 perusteella voidaan todeta, että talotyypeittäin pientalojen kosteuslisien keskiarvoissa oli joitain eroavaisuuksia. Erot johtuvat kuitenkin lähinnä erilaisesta ilmanvaihdosta, asumistiheydestä ja vaipan ilmanpitävyydestä. Ilmanvaihdon

osalta vaikutus näkyy selvemmin kerrostaloasunnoissa (taulukko 2.6.4). Asukasmäärällä ei ollut suurta vaikutusta kosteuslisään. Kerrostaloasunnoissa vaikutus oli jopa hieman epälooginen, koska useamman kuin yhden ihmisen asunnoissa kosteuslisä oli pienempi. Kuvassa 2.6.2 on esitetty pientalojen asukasmäärän vaikutus sisäilman kosteuslisään. Vaikka taulukossa 2.6.3 eroa ei ollut havaittavissa, näkyy kuvassa pieni ero siten, että taloissa, joissa oli yli kolme asukasta, kosteuslisä oli korkeampi talviolosuhteissa.

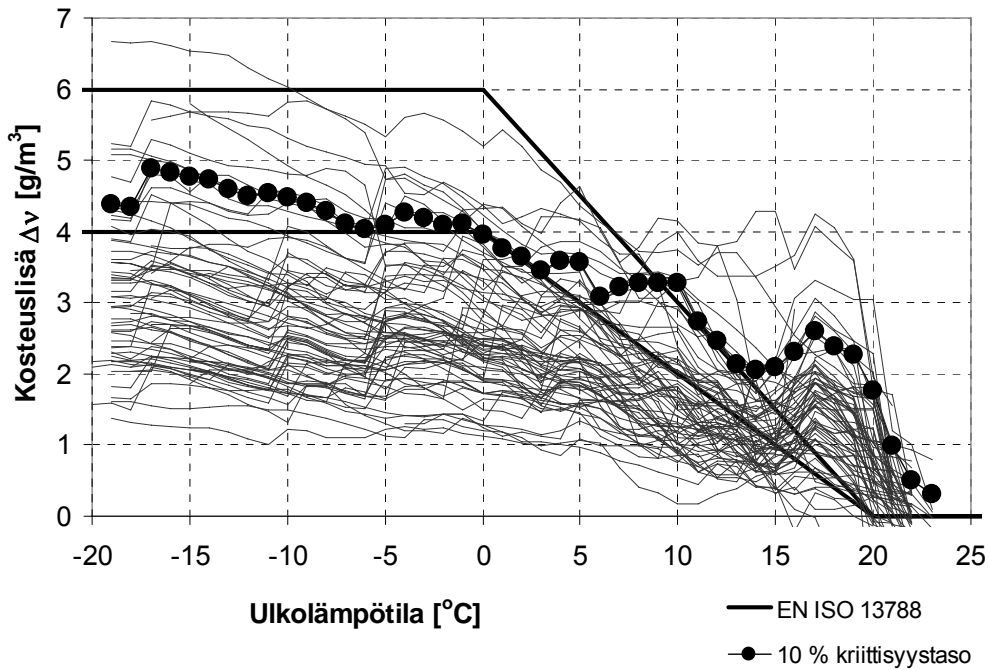


Kuva 2.6.2 Sisäilman kosteuslisä pientaloissa asukasmäärän mukaan jaoteltuna talviolosuhteissa (musta viiva) ja muuna aikana (harmaa viiva).

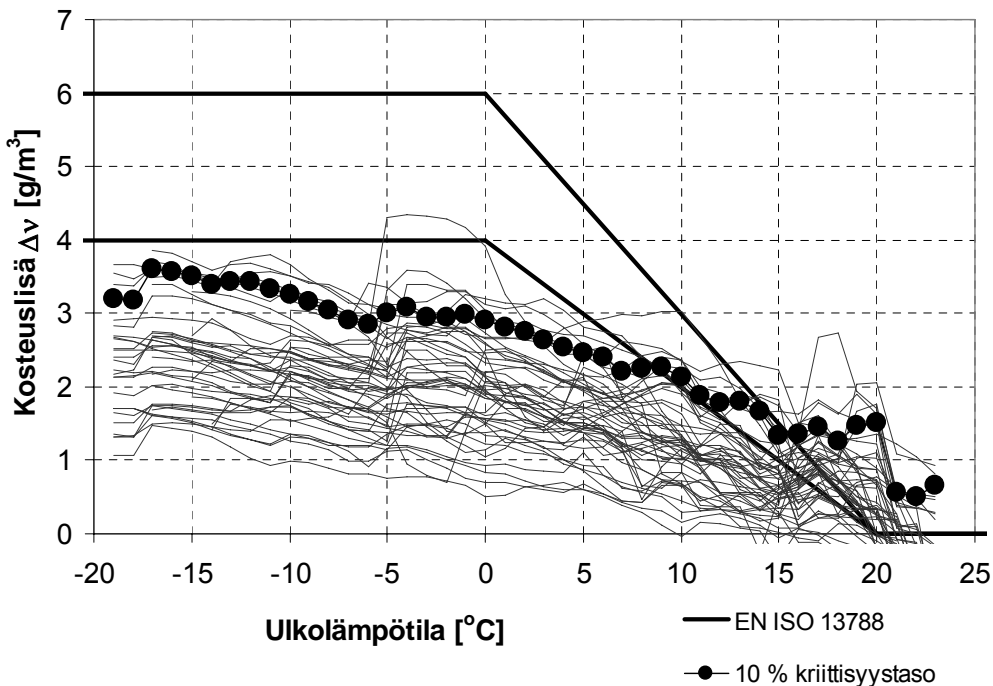
2.6.3.2 Kosteuslisän riippuvuus ulkoilman lämpötilasta ja kosteuslisän mitoitusarvo

Kuvassa 2.6.3 on esitetty kaikkien mitattujen pientalojen ja kuvassa 2.6.4 kaikkien mitattujen kerrostaloasuntojen kosteuslisän maksimi- ja keskiarvot liukuvana viikkokeskiarvona ulkolämpötilan viikkokeskiarvon funktiona. Tällöin saadaan kosteuslisän maksimi- ja keskiarvot kussakin mitatussa kohteessa 7 päivän pituisilta ajanjaksoilta kaikilla ulkolämpötilan arvoilla. Jokainen viiva kuvaa yhden kohteen kosteuslisän maksimi- ja keskiarvojen tulosta ulkolämpötilan funktiona. Palloviiva osoittaa ylempää kohteiden mukaan laskettua 10 % kriittisyystasoa (ks. luku 2.6.2). Tähän käyrään verrattuna 10 %:ssa huoneista kosteuslisän maksimi- ja keskiarvot olivat suurempia ja 90 %:ssa huoneista alhaisempia. Suorat viivat kuvaavat EN ISO 13788 (2001) -standardin pienen asumistiheyden (luokka 3) mukaisen asunnon kosteuslisän mitoituskäyriä ulkolämpötilan funktiona (ylä- ja alaraja). Standardin mukaisesti kosteuslisä on 4–6 g/m³ talviolosuhteissa (≤ 0 °C) ja 0 g/m³ kesäolosuhteissa (≥ 20 °C). Eri luokat on määritelty standardissa siten, että niissä kosteuslisän taso muuttuu talviolosuhteissa 2 g/m³ välein. Kesäolosuhteissa kosteuslisä on 0 g/m³ kaikissa luokissa.

EN ISO 13788 (2001) -standardissa suositellaan, että kosteuslisän mitoitusarvot kerrotaan vielä osavarmuuskertoimella 1,1, jos laskenta tehdään ko. standardissa kuvatulla menetelmällä. Tämä osavarmuuskerroin ei ota huomioon asukkaiden määrää ja heidän asuintapojaan, joten nämä tekijät on otettava huomioon kosteuslisän mitoitusarvoissa.



Kuva 2.6.3 Sisäilman kosteuslisän viikkokeskiarvon maksimiarvon muutos pientaloissa ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 2.6.4 Sisäilman kosteuslisän viikkokeskiarvon maksimiarvon muutos kerrostaloissa ulkolämpötilan funktiona.

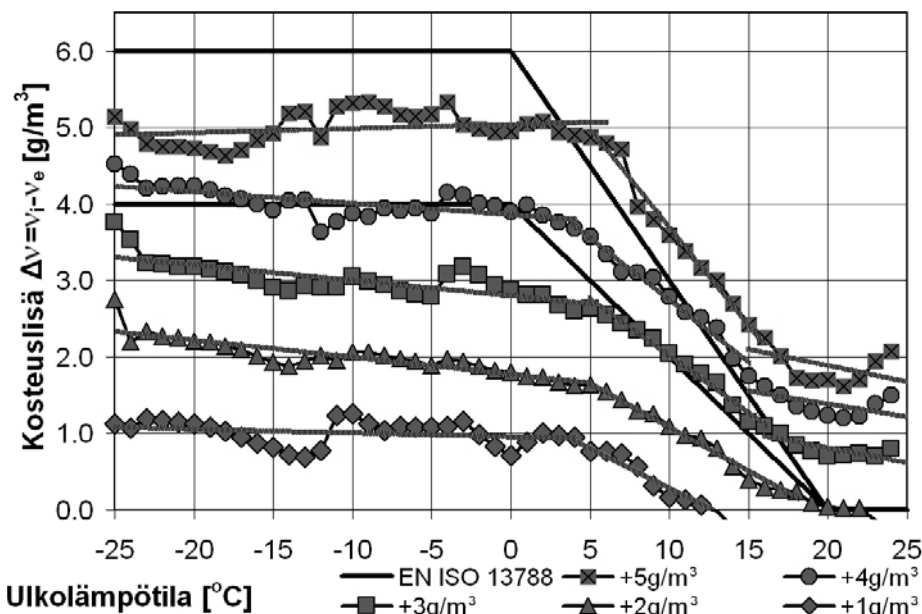
Kosteuslisä ei ole vakio ympäri vuoden ja sen riippuvuus ulkolämpötilasta tulee selvästi esille kuvista 2.6.3 ja 2.6.4. Talvella 10 % kriittisyystasoa vastaava kosteuslisä on pientaloilla välillä 3,5–4,9 g/m³ ja kerrostaloilla välillä 2,5–3,6 g/m³. Kesällä 10 % kriittisyystasoa vastaavat arvot ovat enimmillään pientaloille 2,6 g/m³ ja kerrostaloille 1,5 g/m³. Kesän pienempi kosteuden tuotto (ihmiset ovat enemmän ulkona, pyykkiä kuivatetaan ulkona jne.) ja isompi ilmanvaihtuvuus (enemmän ikkunatuuletusta ja puhaltimen isompi käyttönopeus) pienentävät kosteuslisän tasoa.

Kuvissa 2.6.3 ja 2.6.4 esitettyjen 10 % kriittisyystasojen käyriä ja standardin EN ISO 13788 (2001) käyriä vertailemalla voidaan havaita seuraavia eroja:

- Kosteuslisä ei ole kesäolosuhteissa 0 g/m^3 kuten standardissa, vaan selvästi suurempi
- Kosteuslisän riippuvuus ulkolämpötilasta on erilainen. Standardissa käyrän kulmakertoimen muuttumiskohdat ovat $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $0 \text{ }^\circ\text{C}$ kohdalla, kun taas mittaustulosten perusteella kulmakertoimet eivät muutu näin selkeästi.
- Talviolosuhteissa kosteuslisän käyrä on hitaasti nouseva, kun standardissa puolestaan on vakio kosteuslisä.

Nämä tulokset ovat samantyyppiset kuin aiemmin puurunkoisten pientalojen yhteydessä määritetyt kosteuslisät (Vinha et. al. 2005). Suurimmat erot olivat seuraavat (kuva 2.6.5):

- Puurunkoisissa pientaloissa kosteuslisät eivät nousseet merkittävästi talviolosuhteissa ($\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$) ulkolämpötilan laskiessa.
- Puurunkoisissa pientaloissa kosteuslisät eivät myöskään laskeneet kesäolosuhteissa ($\geq 15 \text{ }^\circ\text{C}$) niin nopeasti kuin massiivirakenteisissa pientaloissa ulkolämpötilan noustessa.

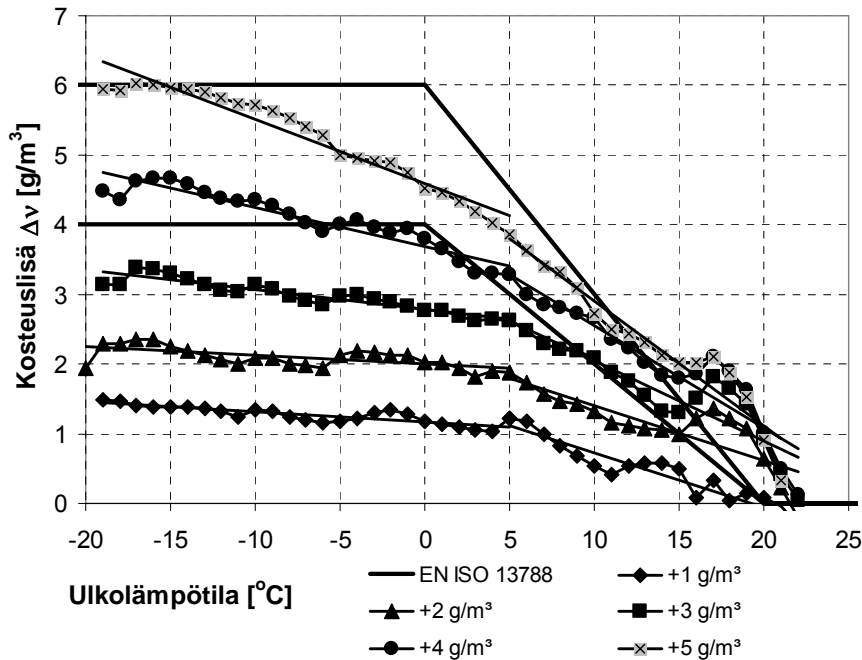


Kuva 2.6.5 Sisäilman kosteuslisän eri tasojen muutos ulkolämpötilan funktiona puurunkoisissa pientaloissa (Vinha et al. 2005).

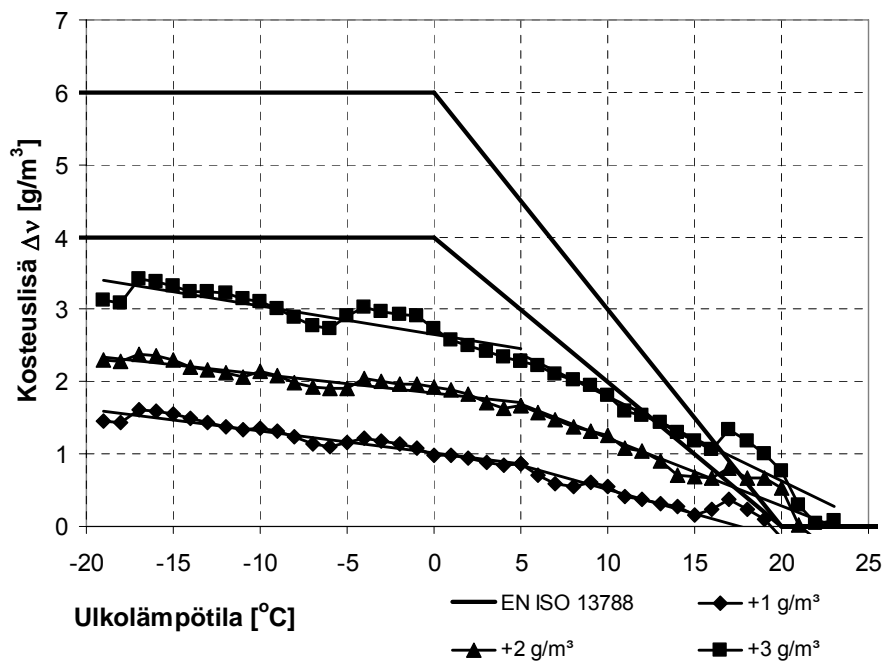
Kummassakin tutkimuksessa mitatuista eroista johtuen voidaan todeta, että sisäilman kosteuslisälle on syytä määrittää eri mitoituskäyrät kuin EN ISO 13788 (2001) -standardissa on esitetty. Tämä on perusteltua mm. siksi, että kesä- ja syysolosuhteissa homeen kasvu voi olla vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittinen tekijä, koska korkeammissa lämpötiloissa esiintyvä sisäilman kosteuslisä nostaa merkittävästi homeen kasvun riskiä.

Kosteusteknistä tarkastelua varten tarvitaan myös tietoa kosteuslisän eri tasojen ja ulkolämpötilan välisestä riippuvuudesta. Kuvissa 2.6.6 ja 2.6.7 on esitetty eri kosteuslisän

tasoja vastaavat summakäyrät pientaloille ja kerrostaloille vastaavalla tavalla kuin puurunkoisia pientaloja käsittelevässä tutkimuksessa (Vinha et. al. 2005). Summakäyrät on määritetty kosteuslisän maksimiarvojen perusteella niin, että talviolosuhteissa ($\leq +5\text{ }^{\circ}\text{C}$) kosteuslisän keskiarvo muuttuu 1 g/m^3 välein: $+1\text{ g/m}^3$, $+2\text{ g/m}^3$, $+3\text{ g/m}^3$, $+4\text{ g/m}^3$ ja $+5\text{ g/m}^3$. Talviolosuhteiden kosteuslisän keskiarvo ei noussut tasoa $+3\text{ g/m}^3$ korkeammaksi missään mitatussa kerrostaloasunnossa.



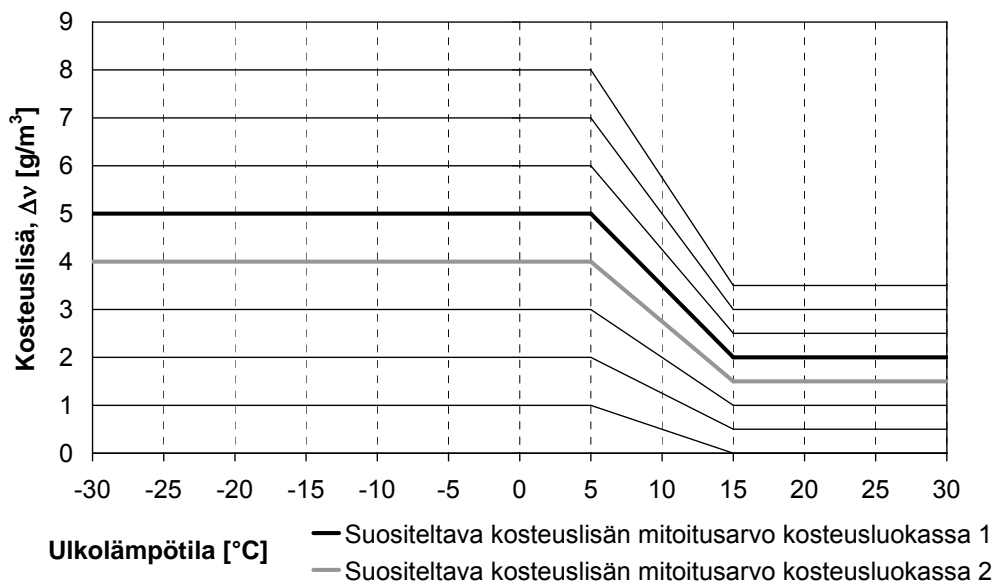
Kuva 2.6.6 Pientalojen sisäilman kosteuslisän eri tasojen muutos ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 2.6.7 Kerrostalojen sisäilman kosteuslisän eri tasojen muutos ulkolämpötilan funktiona.

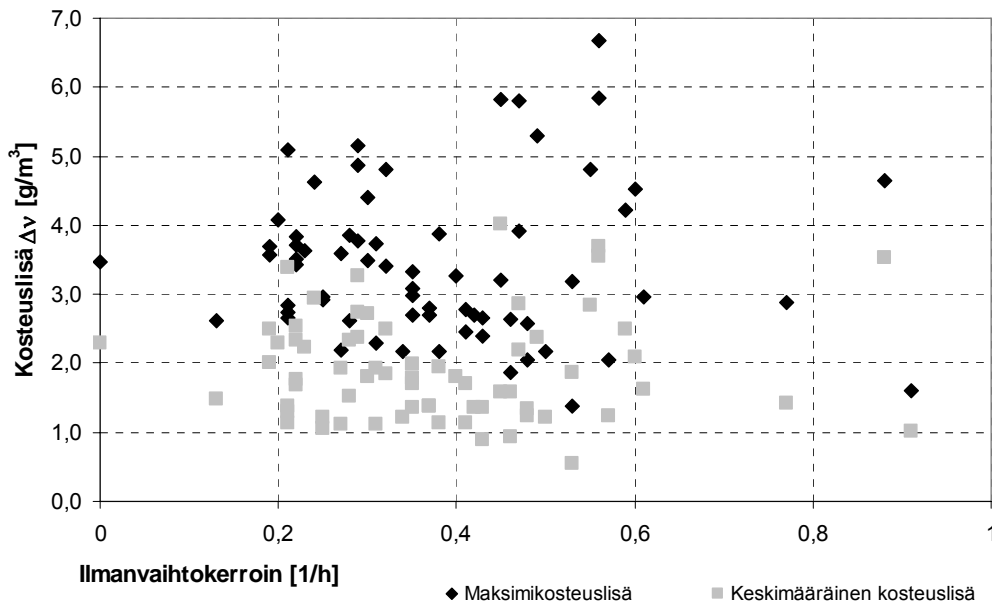
Kuvista 2.6.6 ja 2.6.7 nähdään, että myös kosteuslisän kesäolosuhdearvot muuttuvat talviolosuhdearvojen muuttuessa. Kesäolosuhteissa arvojen muutos on kuitenkin pienempää kuin talvella. Saadut tulokset tukevat kohtuullisen hyvin puurunkoisista pientaloista saatuja tuloksia (Vinha et al. 2005), jossa talviolosuhteissa tapahtunut 1 g/m^3 kosteuslisän muutos vastasi $0,5 \text{ g/m}^3$ kosteuslisän muutosta kesäolosuhteissa. Uudet tulokset tukevat sitä, että kosteuslisän mitoitusarvot voidaan esittää saman käyrästä avulla, joka laadittiin edellisen tutkimuksen tulosten perusteella.

Mitoituskäyrästä on esitetty kuvassa 2.6.8. Kuvaan on merkitty myös suositeltavat kosteuslisän mitoituskäyrät eri kosteusluokan asunnoille. Kosteusluokassa 1 mitoitusarvo talviolosuhteissa on 5 g/m^3 ($T_e \leq +5 \text{ °C}$) ja 2 g/m^3 kesällä ($\geq +15 \text{ °C}$). Kosteusluokassa 2 vastaavat arvot ovat 4 g/m^3 ja $1,5 \text{ g/m}^3$. Talven ja kesän kosteuslisän tasojen välillä kosteuslisä muuttuu lineaarisesti. Kosteusluokka 1 vastaa tapausta, jossa asumistiheys on $\sim 30 \text{ m}^2/\text{henkilö}$, ilmanvaihto on tyydyttävä (IV-kerroin $\geq 0,3 \text{ l/h}$) ja/ tai huoneistossa käytetään lisäkostutusta talvella siten, että suhteellinen kosteus on vähintään 25 % RH. Kosteusluokassa 2 asumistiheys on $\sim 45 \text{ m}^2/\text{henkilö}$, asunnossa on hyvä ilmanvaihto (IV-kerroin $\geq 0,4 \text{ l/h}$) eikä asunnossa käytetä lisäkostutusta. Ilmanvaihdon ja asumistiheyden ollessa erilainen on sisäilman kosteuslisän suuruus arvioitava erikseen. Tehtyjen mittausten perusteella kerrostaloasunnoissa voidaan yleensä käyttää mitoituksessa kosteusluokan 2 arvoja ja pientaloissa kosteusluokan 1 arvoja, vaikka asumistiheydet olivatkin monissa asunnoissa pienempiä kuin edellä annetut ohjearvot.



Kuva 2.6.8 Sisäilman kosteuslisän mitoituskäyrästä pientaloille ja kerrostaloille Suomen ulkoilman olosuhteissa.

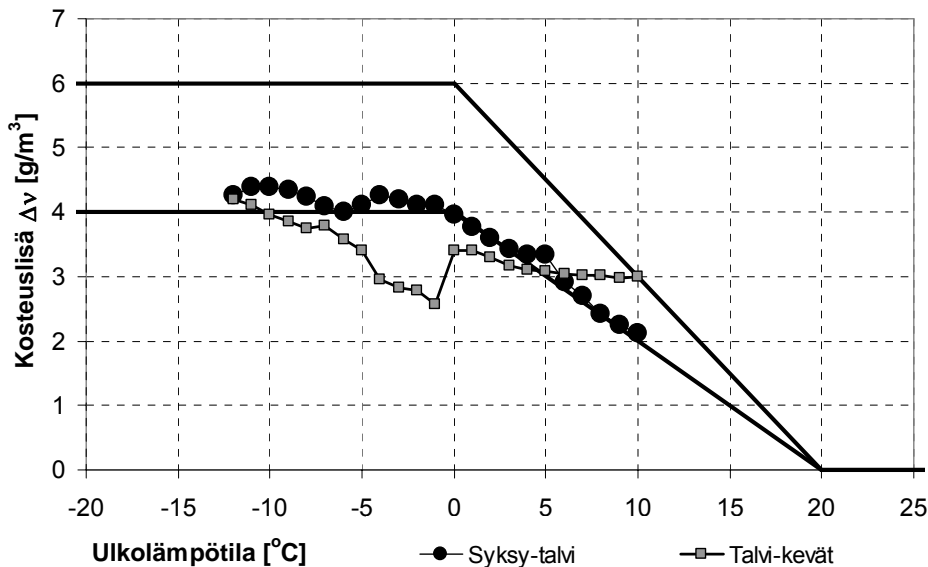
Kuvassa 2.6.9 on esitetty pientalojen talvikauden kosteuslisän keskiarvon ja maksimitulosten riippuvuus ilmanvaihtokertoimesta.



Kuva 2.6.9 Pientalojen sisäilman kosteuslisän keskiarvon ja maksimitulosten riippuvuus talon ilmanvaihtokertoimesta.

Kuvasta 2.6.9 nähdään, että joissakin pientaloissa kosteuslisän maksimiarvot ja keskiarvot olivat varsin korkeita, vaikka ilmanvaihtokerroin olikin suuri. Tällaisia kohteita oli noin 10 kpl koko mittausotoksessa. Aikaisemmassa puurunkoisia pientaloja käsittelevässä tutkimuksessa hajonta ei ollut yhtä suuri (Vinha et al. 2005). Erot johtuvat todennäköisesti ainakin osittain erilaisesta kosteudentuotosta ja mahdollisesti esim. ikkunatuuletuksen määrästä.

Vuorokausitasolla rakennuksen sisustuksessa ja vaipan sisäpinnassa käytetyt hygroskooppiset materiaalit tasaavat sisäilman suhteellisen kosteuden vaihteluita, mutta eivät vaikuta sisäilman kosteuslisän tasoon (ks. luku 2.5.6). Sen sijaan syksy- ja kevätajoja vertailtaessa hygroskooppiset materiaalit vaikuttavat myös kosteuslisän tasoon, vaikka ulko-olosuhteet ja kosteuden tuotto sisällä olisivat samanlaiset. Tämä johtuu siitä, että hygroskooppiset materiaalit sitovat kosteutta keväällä, kun sisäilman suhteellinen kosteus alkaa nousta ja luovuttavat sitä syksyllä, kun suhteellinen kosteus sisällä laskee. Tästä syystä sisäilman kosteuslisä on korkeampi syksyllä kuin keväällä. Kuvasta 2.6.10 nähdään, että mitatuissa kohteissa ulkoilman lämpötilan ollessa korkeintaan 5 °C, on sisäilman kosteuslisä korkeampi syksy-talvikautena kuin talvi-kevätkaudena. Sama ilmiö havaittiin aiemmin myös puurunkoisissa pientaloissa. Hygroskooppiset ominaisuudet eivät kuitenkaan vaikuta kosteuslisän mitoitusarvoihin, koska ne on muodostettu koekohteiden maksimituloksista.



Kuva 2.6.10 Pientalojen sisäilman kosteuslisän tasojen vertailu syksy-talvi ja talvi-kevät kautena.

2.6.3.3 Kosteuden tuotto

Jokaisesta koekohteesta laskettiin talvijaksolta (joulukuu – helmikuu) viikon keskimääräinen kosteustuotto ja maksimikosteustuotto. Maksimikosteustuotolla tarkoitetaan sitä viikkoa, jolloin koekohteen kosteuden tuoton viikon keskiarvo oli suurin. Kaikkien kohteiden viikon keskimääräisen kosteustuoton keskiarvo oli talvijaksolla 8,5 kg/päivä pientaloilla (2,7 kg/(päivä·asukas)) ja 3,0 kg/päivä kerrostaloilla (1,9 kg/(päivä·asukas)). Maksimikosteustuoton keskiarvo oli 15,3 kg/päivä (4,9 kg/(päivä·asukas)) pientaloilla ja 5,7 kg/päivä (3,6 kg/(päivä·asukas)) kerrostaloilla. Korkein viikon keskimääräinen kosteustuotto oli 46,2 kg/päivä pientaloilla ja 12,6 kg/päivä kerrostaloilla. Pientalojen talvijakson kosteudentuoton tulokset on vielä jaoteltu talvijakson keskimääräisen ($\Delta v \leq 2 \text{ g/m}^3$ tai $\Delta v > 2 \text{ g/m}^3$) kosteuslisän mukaan taulukossa 2.6.5. Lähes kaikissa kerrostaloasunnoissa talvijakson keskimääräinen kosteuslisä oli pienempi kuin 2 g/m^3 .

Taulukko 2.6.5 Pientalojen talvijakson kosteudentuoton keskiarvot (ka.) ja maksimikosteustuoton keskiarvot (maks.).

	Kosteuden tuotto, [kg/päivä]			
	Talvijakson kosteuslisä $\Delta v \leq 2 \text{ g/m}^3$ (44 taloa)		Talvijakson kosteuslisä $\Delta v > 2 \text{ g/m}^3$ (24 taloa)	
	ka.	maks.	ka.	maks.
≤ 3 asukasta, pientalot	5,8	11,5	12,0	20,8
> 3 asukasta, pientalot	7,5	14,0	11,7	20,0
Kaikki pientalot	6,7	12,7	11,8	20,3

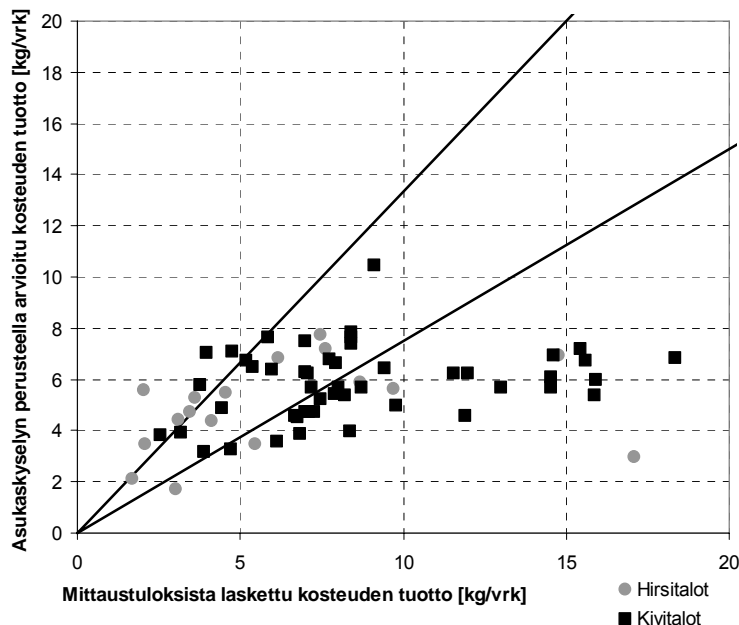
Usein sisäilmaston olosuhteiden tarkastelussa tai kosteusteknisessä suunnittelussa täytyy arvioida kosteuden tuottoa. Asukaskyselyssä kysyttiin asukkaiden asumistapoja ja mahdollisia kosteuslähteitä (ilmankostutin, suihkun ja saunan käyttö, pyykin kuivaus jne). Käyttämällä kirjallisuudesta (Angell 1988, BS 5250 1989, Koch 1986, Trechsel 1994, CIBSE 1999) saatuja keskimääräisiä kosteuslähteiden tuottoarvoja (taulukko 2.6.6) arvioitiin koekohteiden

mahdollinen kosteuden tuotto. Kuvassa 2.6.11 on esitetty sekä koekohteista kosteuslisan ja ilmanvaihtokertoimen perusteella lasketut että asukaskyselyn ja keskimääräisen kosteuden tuoton (taulukko 2.6.6) perusteella arvioidut kosteuden tuoton tulokset pientaloille. Vain noin kolmasosassa koekohteista arvion tulos oli tarkempi kuin 75 %. Tämä osoittaa miten epätarkkaa kosteuden tuoton arvioiminen voi olla, vaikka asukkaiden asumistavat ja kosteuden lähteet onkin kartoitettu. Erot johtuvat mm. siitä, että saman toiminnan synnyttämä kosteustuotto vaihtelee eri ihmisillä. Myös mittaustuloksista laskettu kosteustuoton määrä voi olla todellista suurempi silloin, jos rakennuksen ilmanvaihto on ollut jostain syystä kertamittausten yhteydessä saatua arvoa pienempi.

Tässä tutkimuksessa erot painottuvat siten, että mittaustulosten perusteella laskettu kosteustuotto oli monessa kohteessa selvästi suurempi kuin asukaskyselyn perusteella arvioitu kosteustuotto. Aikaisemmassa puurunkoisissa pientaloissa tehdyssä tutkimuksessa (Vinha et al. 2005) samanlaista painotusta ei havaittu, vaan eroja oli tasaisemmin kumpaankin suuntaan.

Taulukko 2.6.6 Keskimääräinen kosteuden tuotto (kirjallisuuden perusteella).

Kosteuslähte	Kosteuden tuotto, [kg/päivä]
Ihminen	0,9
Koira / kissa	0,4 / 0,1
Keittiötoiminta	0,8
Kasvit (~5 kpl)	0,4
Suihku	0,3
Sauna	1
Vaatteiden pesu ja kuivaus	1



Kuva 2.6.11 Mittaustuloksista lasketun ja asukaskyselyn perusteella arvioidun kosteuden tuoton vertailu pientaloissa (jokainen piste merkitsee yhtä taloa, vinoviivat osoittavat 75 % tarkkuuden aluetta).

2.7 Painesuhteet

2.7.1 Johdanto

Rakenteiden läpi kulkeutuva hallitsematon ilmavuoto vaikuttaa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan, energiankulutukseen, ilmanvaihdon hallittavuuteen, sisäilman termiseen mukavuuteen, sisäilman laatuun sekä palotekniseen toimintaan. Ilmavuoto riippuu rakenteiden ilmanläpäisevyydestä ja sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta. Paine-ero ulko- ja sisäilman välille muodostuu sisäilman ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta, tuulesta ja ilmanvaihdosta ja sen säädöstä. Paine-ero ulkovaipan yli on erilainen rakennuksen eri osissa.

Vesihöyryn konvektion vaikutus rakennuksen (erityisesti kevytrakenteisen) ulkovaipan kosteustekniseen toimintaan on vaipan ilmavuotokohdissa olennaisesti suurempi kuin vesihöyryn diffuusion vaikutus. Sisäilmassa olevan ylipaineen vaikutuksesta kosteutta siirtyy konvektiolla vaipparakenteisiin, mikä nostaa vaipparakenteiden kosteustasoa ja lisää rakenteiden kondensoitumis- ja homehtumisriskiä (Vinha & Käkelä 2001, Kokko et al. 1999). Jotta kosteuskonvektio ei aiheuttaisi rakenteisiin pitkäaikaista kosteusrasitusta, rakennus on suunniteltava ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi (RakMK D2 2003). Poistoilmanvaihdon tapauksessa, kun korvausilmaventtiilejä ei ole asennettu, tulee korvausilma asuntoihin vuotoina ikkunoiden, ovien, 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 (Rantamäki et al. 2000). Kenttämittauksien (Airaksinen et al. 2004, Mattson et al. 2002) perusteella on myös havaittu selviä viitteitä siitä, että ryömintätilan mikrobit kulkeutuvat sisäilmaan. Jotta paine-erot vähentäisivät radonin ja muiden epäpuhtauksien siirtymistä esimerkiksi ryömintätilasta, pitää rakennuksen rakentamismääräysten mukaan olla ryömintätilaan nähden ylipaineinen. Tämä lisää puolestaan kosteuskonvektiosta johtuvaa riskiä alapohjarakenteessa.

Yli- ja alipaineen käyttäminen ilmanvaihto- ja rakenneteknisissä sovellutuksissa edellyttää paineolosuhteiden ja paineistuksen vaikutuksen tuntemista rakenteiden kosteuteen. Sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on yksi lähtöarvo rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi. Jotta rakenteiden rakennusfysikaalisia laskelmia ja laboratoriokokeita tehtäisiin oikeilla lähtöarvoilla, on todellisen paine-eron tunteminen rakenteiden mitoituksen kannalta välttämätöntä.

Tässä projektissa on selvitetty kolmen pientalon ja neljän kerrostaloasunnon talviaikaisia painesuhteita. Ympäristön, ilmavuotopaikkojen jakauman ja ilmanvaihdon vaikutusta painesuhteisiin on tutkittu laskennallisen tarkastelun avulla IDA-ICE-simulointiohjelmalla käyttäen säätietoina Helsingin referenssivuotta (1979) ja analyyttisellä laskentamenetelmällä, jota on käytetty ”Interaction of building envelope and ventilation system in controlling of contaminants and moisture convection in building envelope” (Suomen Akatemian grant 210683) -tutkimusprojektissa.

2.7.2 Menetelmät

2.7.2.1 Kenttämittaukset

Tutkitut pientalot valittiin siten, että ne kuvaisivat mahdollisimman hyvin ilmanvaihtojärjestelmän, ilmanvaihtuvuuden, iän, rakentamistavan, pinta-alan ja asukkaiden lukumäärän osalta ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimusprojektin (Vinha et al. 2005) sadan puurunkoisen pientalon perusteella määritettyä keskimääräistä, tiivistä ja hataraa puurunkoista pientaloa. Kaikissa pientaloissa oli tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Mittauskohteiden ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 2.7.1.

Taulukko 2.7.1 Mitattujen pientalojen ominaisuudet

Kohde	Keskimääräinen talo (kohde 2014*)	Tiivis talo (kohde 3508)	Hatara talo (kohde 3114)
Paine-eron mittauskausi	4.3.2005–24.3.2005	9.2.2007–5.4.2007	20.2.2007–4.5.2007
Minimi / keskimääräinen / maksimi ulkolämpötila mittauskauden aikana	-19 °C / -7,1 °C / 4,9 °C	-23 °C / -1,3 °C / 17 °C	-27 °C / -3,2 °C / 8,4 °C
Talon rakentamisvuosi	2000	2003	2005
Kerrosten lkm	2	2,5	1,5
Pinta-ala	183 m ²	217 m ²	154 m ²
Ilmavuotoluku n ₅₀	3,9 1/h	0,7 1/h	6,9 1/h
Ilmanvaihtuvuus	0,41 1/h, 13 l/(s·henk.), 0,29 l/(s·m ²)	0,47 1/h, 16 l/(s·henk.), 0,31 l/(s·m ²)	0,31 1/h, 16 l/(s·henk.), 0,22 l/(s·m ²)

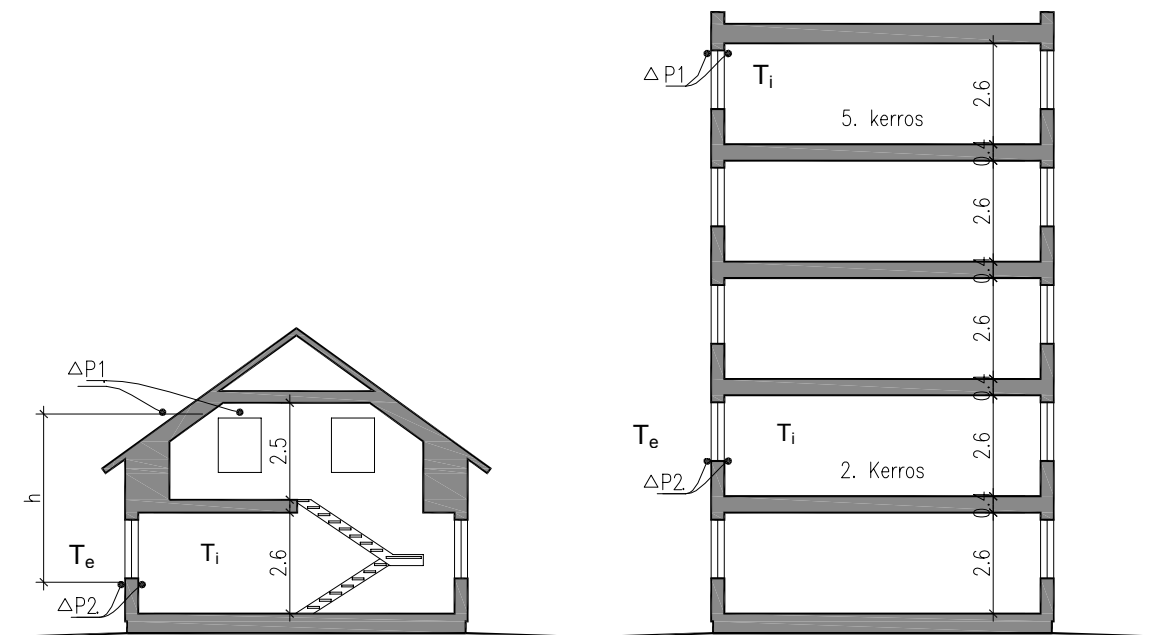
* tutkimuksessa Vinha et al. (2005)

Tutkimukseen valittiin kaksi kerrostaloa, joista kummastakin seurattiin kahta asuntoa. Kummatkin kerrostalot olivat viisikerroksisia: toinen oli betonirakenteinen ja toinen puurakenteinen. Betonirakenteisessa kerrostalossa oli tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä, joka oli asuntokohtaisesti säädetty suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Ilmanvaihtojärjestelmän säätöarvot olivat 50 % RH ja 600–1000 ppm (CO₂). Kaikissa pientaloissa oli tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Mittauskohteiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.7.2.

Taulukko 2.7.2 Mitattujen kerrostaloasuntojen ominaisuudet.

Kohde	5-kerroks. betonirakenteinen kerrostalo		5-kerroks. puurakenteinen kerrostalo	
Paine-eron mittauskausi	16.3.2005–6.4.2005		7.3.2006–7.4.2006	
Minimi / keskimääräinen / maksimi ulkolämpötila mittauskauden aikana			-18 °C / -4,3 °C / 4,7 °C	
Talon rakentamisvuosi	1999		2004	
Ilmanvaihtojärjestelmä	Keskitetty tulo-poisto iv.		Keskitetty tulo-poisto iv.	
Kerrosten lkm / kerros	5 / 2	5 / 5	4 / 2	4 / 4
Asunnon pinta-ala	70 m ²	70 m ²	84 m ²	84 m ²
Ilmavuotoluku n ₅₀	1,0 1/h	1,9 1/h	2,1 1/h	3,0 1/h
Ilmanvaihtuvuus	0,68 1/h,	0,60 1/h,	0,49 1/h,	0,48 1/h,
	0,49 l/(s·m ²)	0,44 l/(s·m ²)	0,35 l/(s·m ²)	0,34 l/(s·m ²)
	9 l/(s·henk.)	15 l/(s·henk.),		

Kenttämittaukset suoritettiin talvikausina. Sisä- ja ulkolämpötila, suhteellinen kosteus ja paine-ero mitattiin loggereilla viiden minuutin välein. Paine-ero mitattiin pientaloissa ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunasta ja toisen kerroksen ikkunan yläreunasta. Kerrostaloissa paine-ero mitattiin toisen kerroksen asunnossa ikkunan alareunasta ja ylimmän kerroksen asunnossa ikkunan yläreunasta (kuva 2.7.1).

**Kuva 2.7.1** Paine-erojen mittauspisteet pientalossa (vasen) ja kerrostalossa (oikea)

2.7.2.2 Laskennallinen tarkastelu

Laskenta suoritettiin puurunkoisessa pientalossa kokeellisesti validoidulla IDA-ICE-mallilla (Jokisalo et al. 2007, ks. myös kappale 3). IDA-ICE on simulointiohjelma, jonka avulla voidaan tutkia rakennuksen eri vyöhykkeiden sisäilmastoa sekä koko rakennuksen energiankulutusta (Vuolle & Sahlin 2000). Herkkyystarkastelussa tutkittiin ympäristön, talon ilmapitävyyden, ilmanvaihtojärjestelmän tasapainotuksen ja vuotopaikkojen jakauman (enemmän vuotoja katon rajalla tai lattian rajalla) vaikutusta. Tutkimuksessa talon

ilmavuotoluvulle n_{50} annettiin kolme eri arvoa: 0,15, 3,93 ja 10 1/h. Ilmavuotoluku 0,15 1/h kuvaa lähes täysin ilmanpitävää taloa, 3,9 1/h kuvaa perustapausta ja Suomen puurunkoisten pientalojen keskiarvoa (Vinha et al. 2005) ja 10 1/h kuvaa hataraa taloa. Ilmavuotokohtien jakaumaa tarkasteltiin kolmessa tapauksessa:

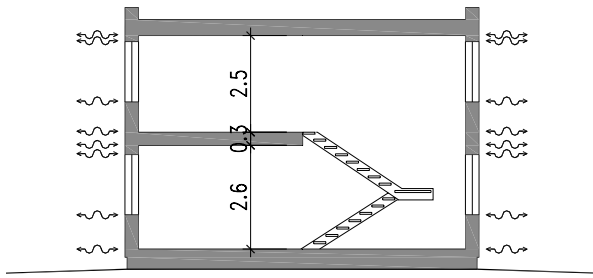
- 1. 75 % ilmavuodoista oli talon katon rajassa ja 12,5 % lattian rajassa ja keskitasolla
- 2. ilmavuotojen mitattu jakauma, joka oli lähes tasainen
- 3. 75 % ilmavuodoista oli talon lattian rajassa ja 12,5 % katon rajassa ja keskitasolla.

Ympäristön ja tuulen vaikutusta tarkasteltiin taajamassa, tasankoalueella ja tuulettomassa ympäristössä. Laskennallinen perustapaus OKT-1 n4 kuvaa rakennusta, joka on taajamaympäristössä, sen ilmavuotoluku n_{50} on 3,9 1/h ja rakennuksen tulo-
poistoilmanvaihtojärjestelmä on tasapainossa. Herkkyystarkastelu sisälsi kaikkiaan 21 koko vuoden laskentatapausta (taulukko 2.7.3). Paine-erotulokset laskettiin ensimmäisen kerroksen lattian ja katon tasolta sekä toisen kerroksen lattian ja katon tasolta.

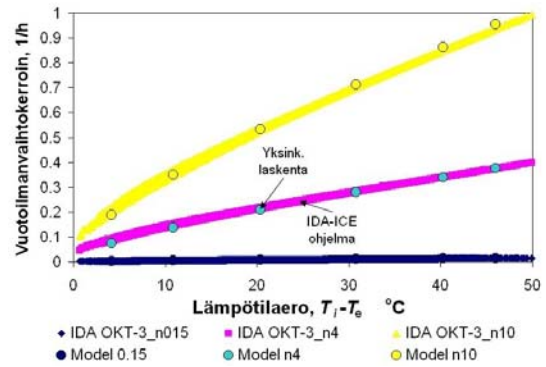
Taulukko 2.7.3 Simulointitapaukset.

		Ilmavuotoluku		
		$n_{50} = 0,15$ 1/h	$n_{50} = 3,93$ 1/h	$n_{50} = 10$ 1/h
Ympäristö	Taajama	OKT-1 n0.15	OKT-1 n4	OKT-1 n10
	Tasankoalue	OKT-2 n0.15	OKT-2 n4	OKT-2 n10
	Tuuleton	OKT-3 n0.15	OKT-3 n4	OKT-3 n10
Ilmavuotojen sijainti	Enemmän vuotoja katon tasolla (75/12,5/12,5%)	OKT-4 n0.15	OKT-4 n4	OKT-4 n10
	Mitattu jakauma	OKT-1 n0.15	OKT-1 n4	OKT-1 n10
	Enemmän vuotoja lattian tasolla (12,5/12,5/75%)	OKT-5 n0.15	OKT-5 n4	OKT-5 n10
Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainoisuus	15 % vähemmän tuloilmaa	OKT-6 n0.15	OKT-6 n4	OKT-6 n10
	Tasapainoinen järjestelmä	OKT-1 n0.15	OKT-1 n4	OKT-1 n10
	15 % enemmän tuloilmaa	OKT-7 n0.15	OKT-7 n4	OKT-7 n10

Ilmanvaihdon tasapainotuksen, ilmapitävyyden ja lämpötilaeron vaikutusta painesuhteisiin tutkittiin myös yksinkertaistetulla laskentaohjelmalla, joka laskee ilmavuotojen massatasapainon. Laskennassa oli mukana 8 vuotopaikkaa (kuva 2.7.2, vasen): ensimmäisen ja toisen kerroksen lattian ja katonraja sekä ikkunoiden ala- ja yläreuna. Vuotoilmanvaihto riippui vuotojakaumasta, sisä- ja ulkolämpötilan erosta (savupiippuvaikutus) ja ilmanvaihdosta. Tuulen vaikutusta laskelmissa ei otettu mukaan. Kuvassa 2.7.2 oikealla on esitetty IDA-ICE-ohjelmalla ja yksinkertaistetulla laskentaohjelmalla laskettujen vuotoilmanvaihtokertoimen vertailu.



Kuva 2.7.2 Ilmavuotokohtien sijainnit paine-erolaskelmissa (vasen) sekä IDA-ICE-ohjelmalla ja yksinkertaistetulla laskentaohjelmalla laskettujen vuotoilmavaihtokertoimien vertailu (oikea).



2.7.3 Tulokset

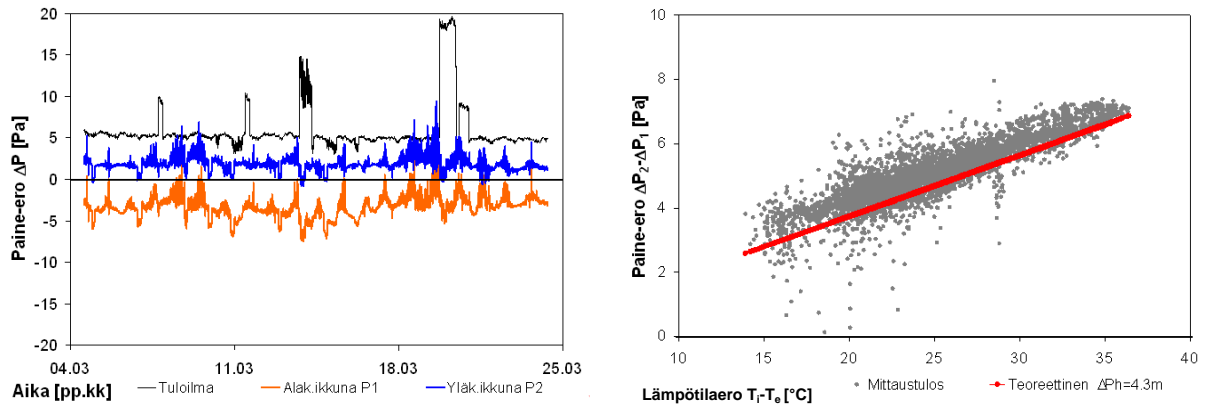
2.7.3.1 Kenttämittaukset

Pientalojen paine-erot on esitetty kuvissa 2.7.3, 2.7.4 ja 2.7.5. Vasemmanpuoleisissa kuvissa on esitetty mittaustulokset kahdesta mittauspisteestä. Kuvassa on esitetty myös tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna. Tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna osoittaa ilmanvaihtokoneen käyttöä koko mittausjakson aikana. Oikeanpuoleisissa kuvissa on esitetty ensimmäisen ja toisen kerroksen paine-eron erotuksen ja sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen riippuvuus. Kuviin on myös laskettu teoreettinen lämpötilaerosta riippuva paine-eron kuvaaja, joka on laskettu kaavan 2.7.1 avulla.

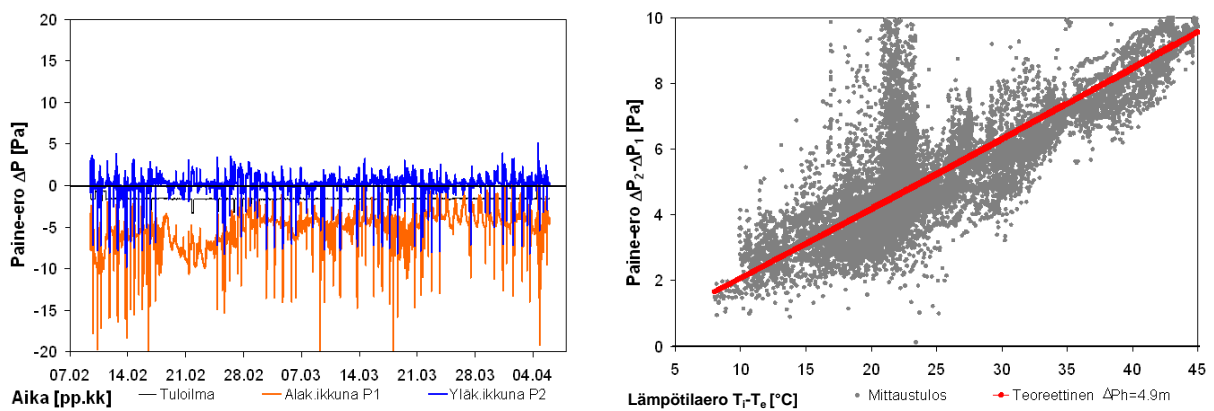
$$\Delta P = \rho_a \cdot g \cdot H \cdot (T_i - T_e) / T_e \quad (2.7.1)$$

missä

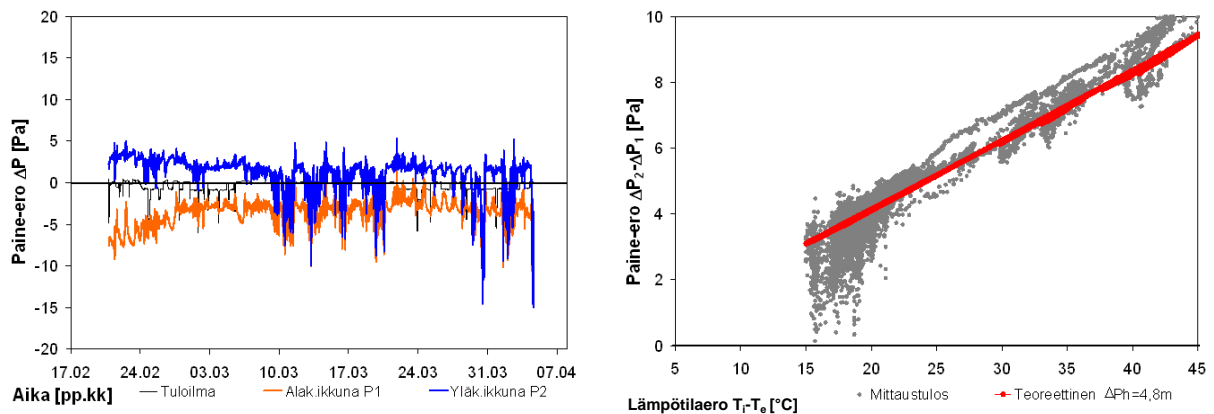
ΔP	paine-ero [Pa]
ρ_a	ilman tiheys [g/m^3]
g	putoamiskiihtyvyyys [$9,81 \text{ m}/\text{s}^2$]
h	mittauspisteiden korkeusero [m]
T_i	sisälämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_e	ulkolämpötila [$^{\circ}\text{C}$]



Kuva 2.7.3 Painesuhteet keskimääräisessä puurunkoisessa pientalossa toisen kerroksen ikkunan yläreunan korkeudella ja ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunan korkeudella sekä tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna (vasen). Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty paine-eron erotuksen ja sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen riippuvuus.



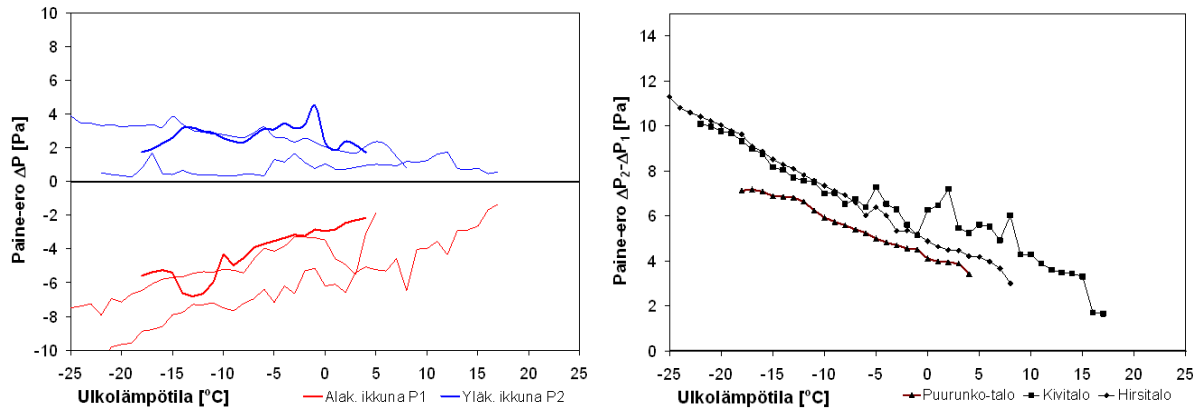
Kuva 2.7.4 Painesuhteet tiiviissä puurunkoisessa pientalossa toisen kerroksen ikkunan yläreunan korkeudella ja ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunan korkeudella sekä tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna (vasen). Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty paine-eron erotuksen ja sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen riippuvuus.



Kuva 2.7.5 Painesuhteet hatarassa puurunkoisessa pientalossa toisen kerroksen ikkunan yläreunan korkeudella ja ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunan korkeudella sekä tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna (vasen). Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty paine-eron erotuksen ja sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen riippuvuus.

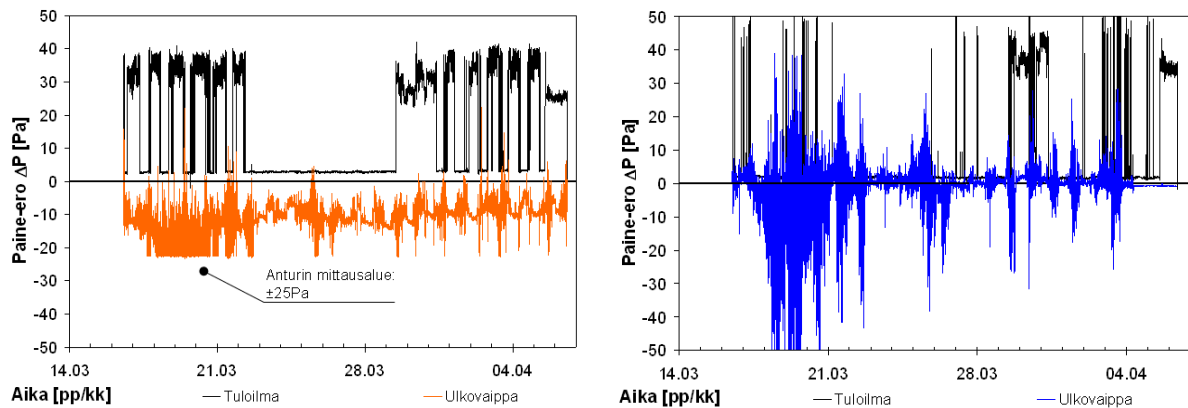
Keskimäärin pientalojen alaosan alipaine oli itseisarvoltaan suurempi kuin yläosan ylipaine. Tämä johtuu siitä, että suurin osa ilmavuodoista sijaitti koekohteissa ulkoseinän ja yläpohjan välisessä liitoksessa (ks. luku 2.3). Mittaustulosten poikkeamat ensimmäisen ja toisen kerroksen paine-eron erotuksen ja sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen riippuvuuden

teoreettisesta käyrästä johtuvat ensisijaisesti tuulen vaikutuksesta, sisäovien olemisesta auki ja mittaustarkkuudesta. Paine-erojen ulkolämpötilariippuvuus 10 % kriittisyystasolla (enintään 10 % paine-eroista oli valittua tasoa suurempia ja 90 % oli pienempiä) toisen kerroksen ikkunan yläreunan korkeudella ja ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunan korkeudella on esitetty kuvassa 2.7.6.

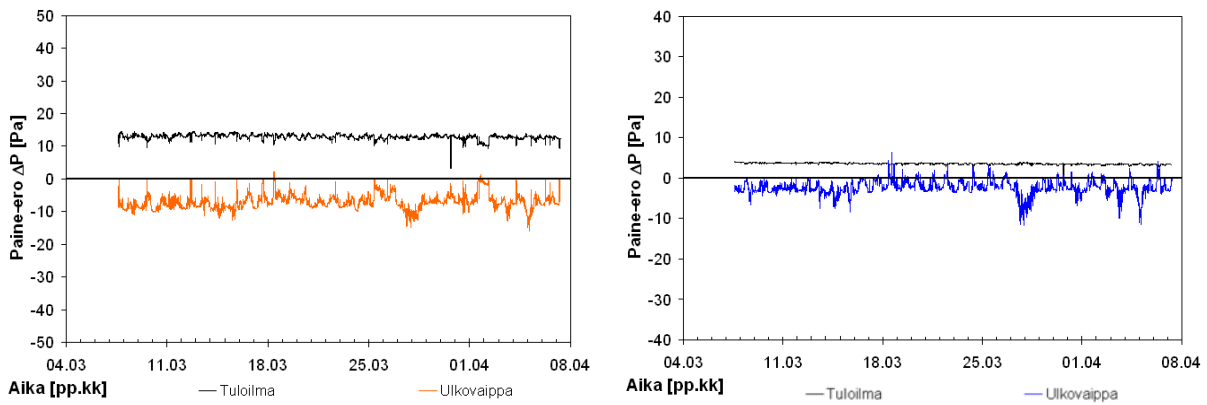


Kuva 2.7.6 Painesuhteet pientaloissa 10 % kriittisyystasolla toisen kerroksen ikkunan yläreunan korkeudella ja ensimmäisen kerroksen ikkunan alareunan korkeudella (vasen). Oikeanpuoleisissa kuvassa on esitetty ensimmäisen ja toisen kerroksen paine-erojen erotuksen ulkolämpötilariippuvuus.

Kerrostaloasuntojen paine-erot ovat esitetty kuvissa 2.7.7 ja 2.7.8. Vasemmanpuoleisissa kuvissa on esitetty mittaustulokset alimman kerroksen asunnosta ja oikeanpuoleisissa kuvissa ylimmän kerroksen asunnoista. Kerrostaloissa ulkovaipan yli oleva paine-ero on isompi kuin pientaloissa. Myös tuulen vaikutus on isompi.



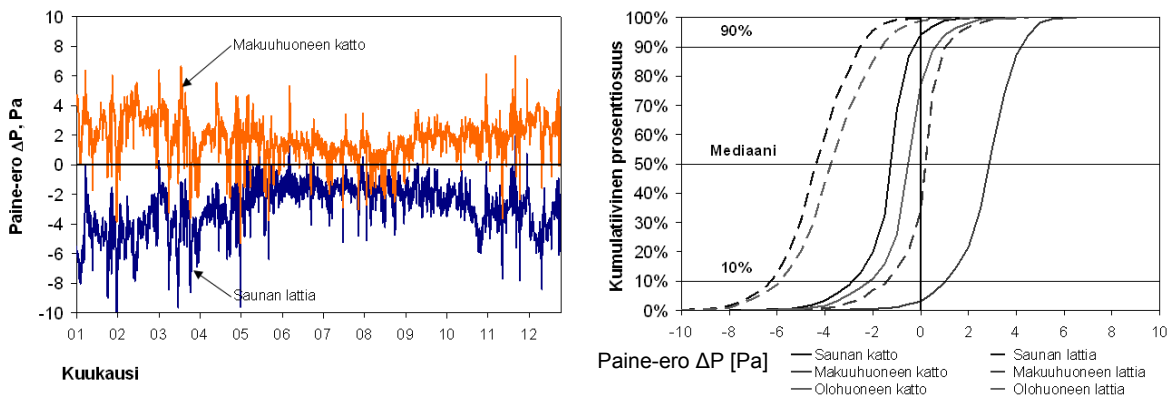
Kuva 2.7.7 Painesuhteet betonirakenteisen kerrostalon z(vasen) ja viidennen kerroksen asunnossa ikkunan yläreunan korkeudella (oikea). Kuvissa on esitetty myös tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna.



Kuva 2.7.8 Painesuhteet puurakenteisen kerrostalon toisen kerroksen asunnossa ikkunan alareunan korkeudella (vasen) ja viidennen kerroksen asunnossa ikkunan yläreunan korkeudella (oikea). Kuvissa on esitetty myös tuloilman paine-ero huonetilaan verrattuna.

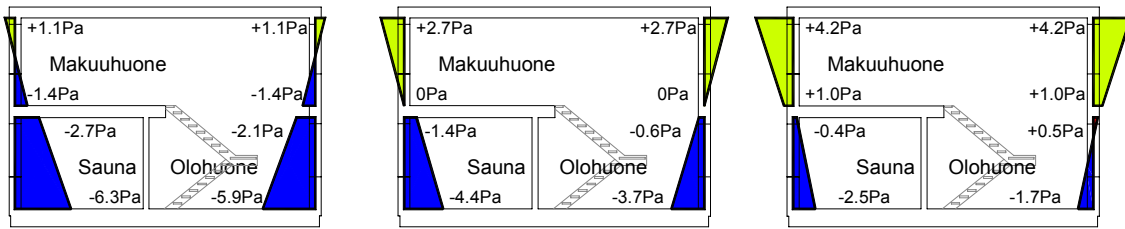
2.7.3.2 Laskennallinen tarkastelu

Kuvassa 2.7.9 (vasen) on esitetty koko vuoden tunnin välein lasketut paine-erot keskimääräisen puurunkoisen pientalon ensimmäisestä kerroksesta saunan lattian tasolta ja toisesta kerroksesta makuuhuoneen katon tasolta peruslaskentatapauksessa (OKT-1 n4). Kuvan perusteella toisen kerroksen katon tasolla makuuhuoneessa on pysyvä ylipaine ja ensimmäisen kerroksen lattian tasolla saunassa pysyvä alipaine. Kuvassa 2.7.9 (oikea) on esitetty paine-erojen talvikuukausien pysyvyyskäyrät ensimmäisen kerroksen saunan ja olohuoneen lattian ja katon tasolla, sekä toisen kerroksen makuuhuoneen lattian ja katon tasolla. Kuvaan on myös piirretty kymmenen prosentin kriittisyystasot alipaineelle ja ylipaineelle (10 %:ssa laskentatuloksista ali- tai ylipaine oli suurempi).



Kuva 2.7.9 Keskimääräisessä puurunkoisessa pientalossa laskettu koko vuoden paine-ero toisen kerroksen makuuhuoneen katon ja ensimmäisen kerroksen saunan lattian tasolla (vasen). Talvikuukausien paine-ero ensimmäisen kerroksen saunan ja olohuoneen lattian ja katon tasolla sekä toisen kerroksen makuuhuoneen lattian ja katon tasolla on esitetty oikealla.

Keskimääräinen paine-ero sekä 10 % kriittisyystaso alipaineelle ja ylipaineelle on esitetty kuvassa 2.7.10. Ylipainetta voi esiintyä sekä toisen kerroksen katon ja lattian tasolla että ensimmäisen kerroksen katon tasolla (välipohjan liitos). Alipainetta voi esiintyä sekä ensimmäisen kerroksen katon ja lattian tasolla, että toisen kerroksen lattian tasolla.

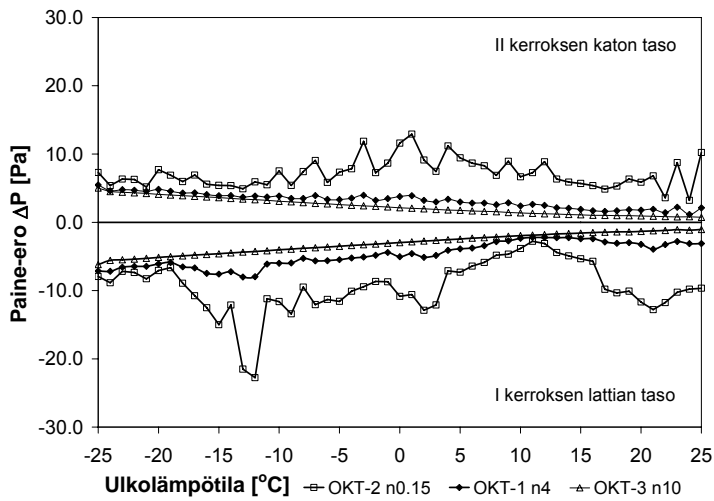


Kuva 2.7.10 Keskimääräinen paine-ero sekä 10% kriittisyystaso alipaineelle (vasen) ja ylipaineelle (oikea) talvikuukausina.

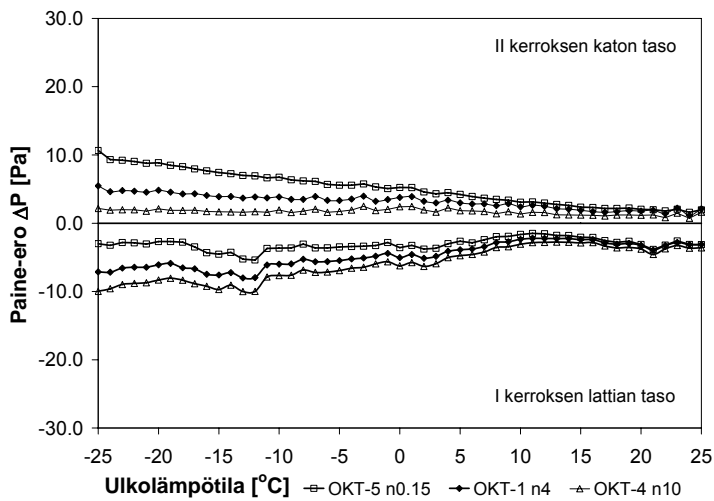
Koko vuoden laskennallisten paine-erojen alempi ja ylempi 10 % kriittisyystaso on esitetty taulukossa 2.7.4. Kuvissa 2.7.11, 2.7.12 ja 2.7.13 on esitetty paine-erojen 10 % kriittisyystasojen ulkolämpötilariippuvuus. Saman laskentatapauksen käyristä ylempi on paine-ero toisen kerroksen katon tasolla ja alempi käyrä on paine-ero ensimmäisen kerroksen lattian tasolla. Laskennallinen tarkastelu osoittaa, että paine-eron suunnitteluarvon tulee olla vähintään ± 10 Pa luokkaa. Kriittisimmissä tapauksissa (ilmanpitävä talo ja tasapainottamaton ilmanvaihto) paine-ero voi nousta ± 30 Pa tasolle. Suuria paine-eroja on havaittu myös aikaisemmissa kenttämittauksissa (Kurnitski et al. 1998).

Taulukko 2.7.4 Paine-erojen laskentatulokset pientaloissa.

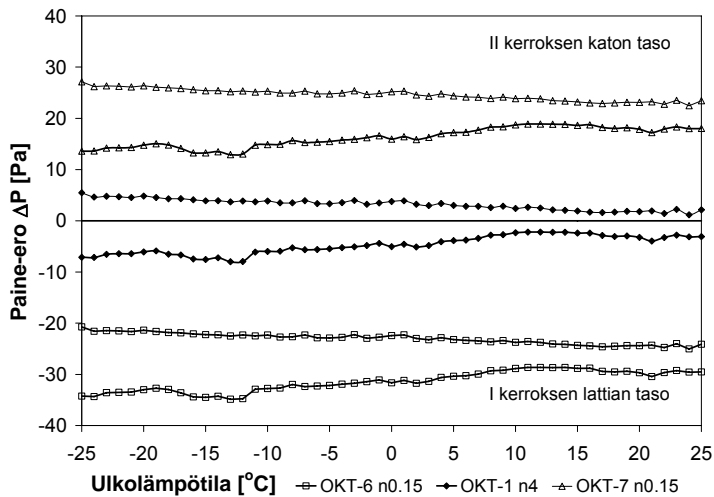
Ilmavuotoluku Kriittisyystaso		Paine-ero, ΔP [Pa]					
		$n_{50} = 0,15$ 1/h		$n_{50} = 3,93$ 1/h		$n_{50} = 10$ 1/h	
		10%	90%	10%	90%	10%	90%
Ympäristö	Taajama	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	Tasankoalue	-11	+8	-10	+8	-8	+7
	Tuuleton	-6	+4	-5	+4	-5	+4
Ilmavuotojen sijainti	Enemmän vuotoja katon tasolla (75/12,5/12,5%)	-10	+2	-9	+2	-8	+2
	Mitattu jakauma	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	Enemmän vuotoja lattian tasolla (12,5/12,5/75%)	-4	+8	-3	+8	-3	+8
Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainoisuus	15 % vähemmän tuloilmaa	-33	-22	-7	+4	-6	+4
	Tasapainoinen järjestelmä	-7	+4	-6	+4	-6	+4
	15 % enemmän tuloilmaa	+15	+26	-6	+5	-5	+4



Kuva 2.7.11 Ympäristön (tuulen) vaikutus paine-eron 10 % kriittisyystasoon eri ulkolämpötiloilla ja talon eri ilmapitävyydellä: OKT-2 n0.15: tasankoalue, $n_{50} = 0,15$ 1/h; OKT-1 n4: taajama, $n_{50} = 4$ 1/h; OKT-3 n10: tuuleton, $n_{50} = 10$ 1/h

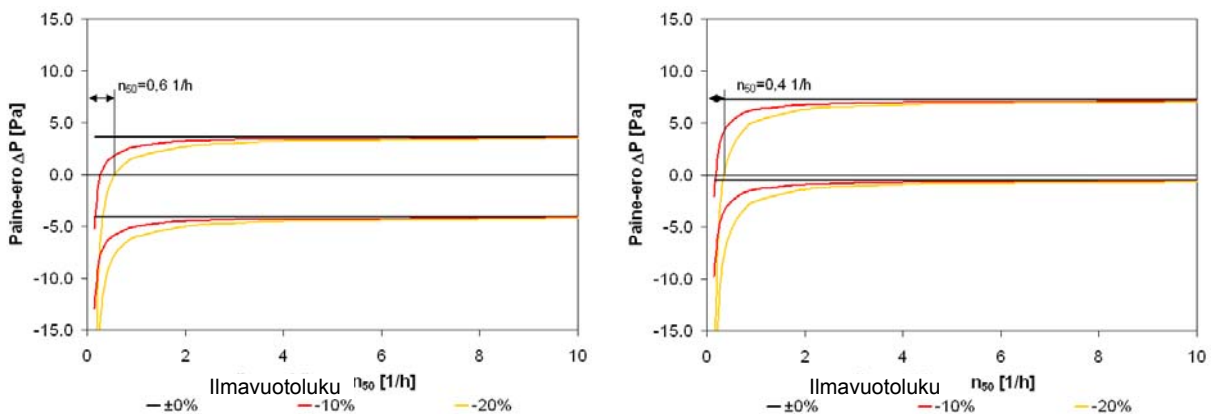


Kuva 2.7.12 Ilmavuotopaikkojen sijainnin vaikutus paine-eron 10 % kriittisyystasoon eri ulkolämpötiloilla ja talon eri ilmapitävyydellä: OKT-5 n0.15: enemmän vuotoja lattian tasolla, $n_{50} = 0,15$ 1/h; OKT-1 n4: mitattu jakauma (ks. Taulukko 3.2.2), $n_{50} = 4$ 1/h; OKT-4 n10: enemmän vuotoja katon tasolla, $n_{50} = 10$ 1/h



Kuva 2.7.13 Ilmanvaihtojärjestelmän tasapainotuksen vaikutus paine-eron 10 % kriittisyystasoon eri ulkolämpötiloilla ja talon eri ilmanpitävyydellä: OKT-6 n0.15: 15 % vähemmän tuloilmaa, $n_{50} = 0,15$ 1/h; OKT-1 n4: tasapainoinen järjestelmä, $n_{50} = 4$ 1/h; OKT-7 n0.15: 15 % enemmän tuloilmaa, $n_{50} = 0,15$ 1/h.

Sitä, voidaanko ilmanvaihdon avulla vaikuttaa painesuhteisiin ja miten paljon tähän vaikuttaa talon ilmanpitävyys, tutkittiin yksinkertaisella (tuulen vaikutusta ei otettu huomioon) laskentaohjelmalla. Kun ilmavuotojen jakauma on tasainen ja poistoilmamäärä on 20 % suurempi kuin tuloilmamäärä, pystytään -10°C ulkolämpötilassa poistamaan ylipaine toisen kerroksen katon tasolla, kun kaksikerroksisen talon ilmavuotoluku on $\leq 0,6$ 1/h (kuva 2.7.14, vasen). Kun vuodoista 75 % on lattian tasolla, pitäisi samoissa olosuhteissa talon ilmavuotoluku olla $\leq 0,4$ 1/h (kuva 2.7.14 oikea).



Kuva 2.7.14 Ilmanvaihdon tasapainotuksen vaikutus painesuhteisiin, kun ilmavuotojen jakauma on tasainen (vasen) tai 75 % ilmavuodoista sijaitsee ensimmäisen kerroksen lattian tasolla (oikea).

2.8 Energiankulutus

Tässä osiossa käsitellään hankkeessa tutkittujen pientalojen energiankulutusta. Tiedot rakennusten lämmitysmuodoista, lämmönjakojärjestelmistä ja energiankulutuksesta on saatu asukkaiden täyttämistä asukastietolomakkeista (liite 3). Lomakkeessa asukkaat ovat ilmoittaneet arvionsa vuoden aikana käyttämästään sähköenergiasta sekä öljy- ja polttopuutilavuudesta. Arviot ovat, kohteesta riippuen, joko vuodelta 2004 tai 2005. Öljytilavuus on muunnettu energiasuureeksi kevyen polttoöljyn tehollisella lämpöarvolla 10 kWh/dm³ ja polttopuutilavuus havu- ja sekapuupilkkeen tehollisella lämpöarvolla 1300 kWh/(pino-m³). Lämpöarvot ovat Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta D5 (2007). Taulukossa 2.8.1 on esitetty pientalojen lämmitysmuoto ja lämmönjakojärjestelmät. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että joidenkin kohteiden osalta osa asukaskyselylomakkeen tiedoista on ollut puutteellisia, selvästi virheellisiä tai puuttunut kokonaan.

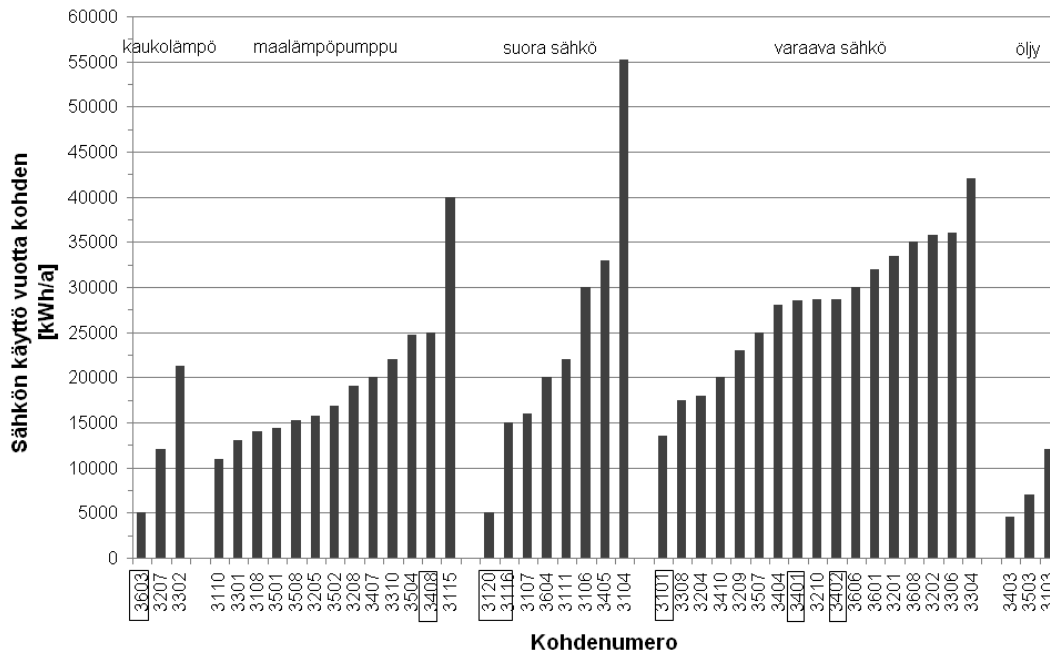
Taulukko 2.8.1 Pientalojen lämmitysmuodot ja lämmönjakojärjestelmät.

Lämmitysmuoto	Lukum.	Lämmönjakojärjestelmä	Lukum.
varaava sähkö	16	Vesikeskuslämmitys	46
maalämpöpumppu	15	lattialämmityksellä	42
suora sähkö	11	lattialämmityksellä sekä sähkölämmitys	
kaukolämpö	8	kattolämmityksellä	2
öljy	5	lattialämmityksellä sekä ilmalämmitys	1
varaava sähkö ja puu	3	lattialämmityksellä sekä varaava takka	1
öljy ja puu	2	Sähkölämmitys	24
kaukolämpö ja puu	1	lattialämmityksellä	11
maakaasu	1	katto- ja lattialämmityksellä	4
maalämpöpumppu ja puu	1	pattereilla ja lattialämmityksellä	4
maalämpöpumppu järjestä	1	pattereilla	3
poistoilmalämpöpumppu	1	lattia- ja kattolämmityksellä sekä	
puu	1	ilmalämmityksellä	1
suora ja varaava sähkö	1	lattialämmityksellä (varaava takka)	1
suora ja varaava sähkö sekä puu	1		
suora sähkö ja puu	1		
suora sähkö, maalämpö- ja poistoilmalämpöpumppu	1		

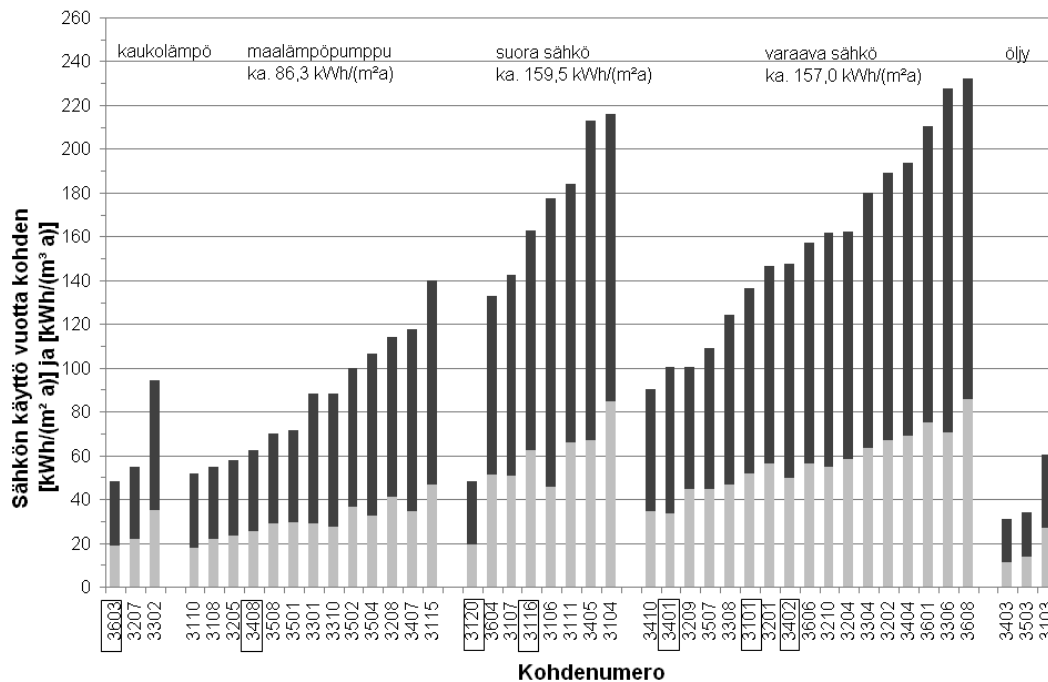
2.8.1 Sähkön kulutus

Asukaskyselylomakkeessa talojen lämmitysjärjestelmät on jaettu viiteen ennalta määriteltyyn pääluokkaan: suoraan sähkölämmitykseen, varaavaan sähkölämmitykseen, öljylämmitykseen, maalämpöpumpun käyttöön ja puun polttamiseen. Lisäksi samassa yhteydessä on ollut mahdollisuus sanallisesti kuvailla käytettyä lämmitysjärjestelmää, jos järjestelmä tai jokin sen osa ei ole ollut yksikään edellä mainituista. Lämmitysjärjestelmiä oli joissakin kohteissa useita. Kuvassa 2.8.1 on esitetty asukkaiden ilmoittama vuotuinen sähkön käyttö lämmitysjärjestelmittäin luokiteltuna ja kuvassa 2.8.2 sama luku kunkin kohteen ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella lattiapinta-alalla ja tilavuudella jaettuna. Ne järjestelmät, joita koko

joukossa on ollut vain yksi, on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Kuviin on merkitty laatikolla ne kohteet, joissa pääasiallisesti katsotun lämmitysjärjestelmän rinnalla on myös muita lämmitysjärjestelmiä.



Kuva 2.8.1 Pientalojen vuotuinen sähkön käyttö lämmitysjärjestelmittäin luokiteltuna. Laatikolla merkityissä kohteissa on myös muita lämmitysjärjestelmiä (samaa merkintää on käytetty myös muissa tässä kappaleessa jäljempänä esitettävissä kuvissa).

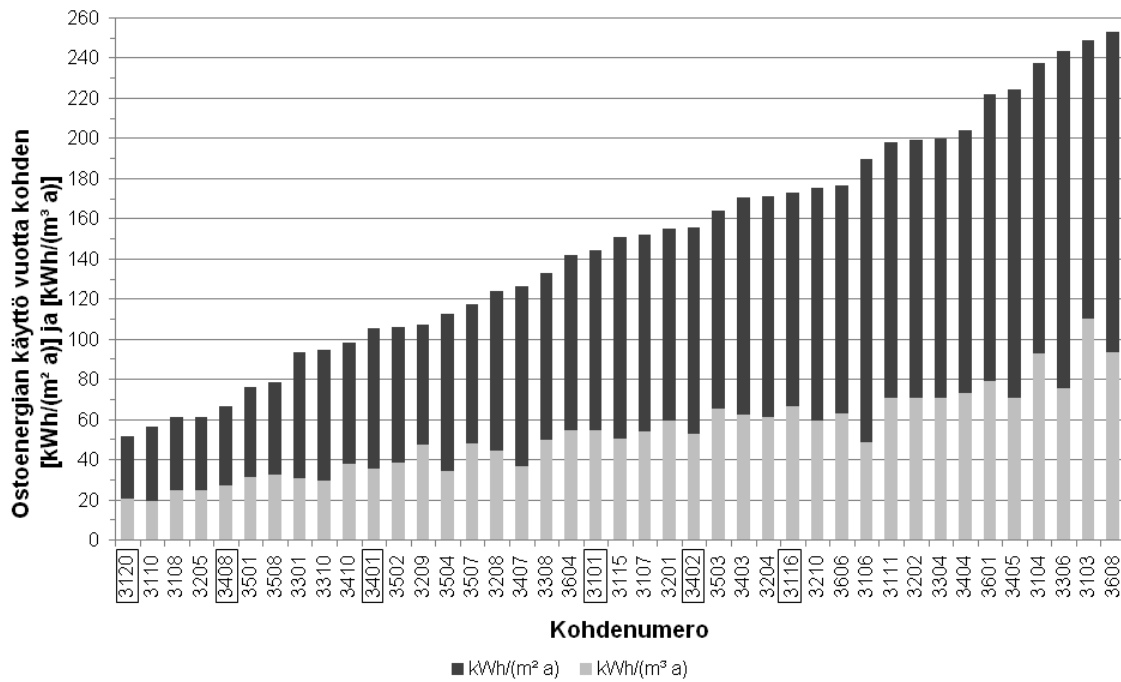


Kuva 2.8.2 Pientalojen vuotuinen sähkön käyttö lämmitysjärjestelmittäin luokiteltuna ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella lattiapinta-alalla ja tilavuudella jaettuna. Tässä ja muissa vastaavissa kuvissa palkkien vaalean harmaa alaosa kuvaa energian käyttöä tilavuutta kohden ja koko palkki (vaalea ja tumma osa) sähkön käyttöä pinta-alaa kohden.

Sähkön kulutus sisältää kaiken sähkön mittarilukeman perusteella. Kaukolämpö- ja öljylämmitystaloja lukuun ottamatta sähkön kulutus sisältää myös lämmityksen ja lämpimän käyttöveden valmistuksen. Keskimääräinen sähkön kulutus oli vuodessa kaukolämmöllä lämpiävissä kohteissa 65,7 kWh/m² (25,2 kWh/m³), pääasiallisesti maalämpöpumpulla lämpiävissä kohteissa 86,3 kWh/m² (30,3 kWh/m³), suoralla sähköllä lämpiävissä kohteissa 159,5 kWh/m² (55,7 kWh/m³), varaavalla sähkölämmityksellä lämpiävissä kohteissa 157,0 kWh/m² (56,5 kWh/m³) ja öljyllä lämmitetyissä kohteissa 41,7 kWh/m² (17,2 kWh/m³).

2.8.2 Ostoenergiankulutus

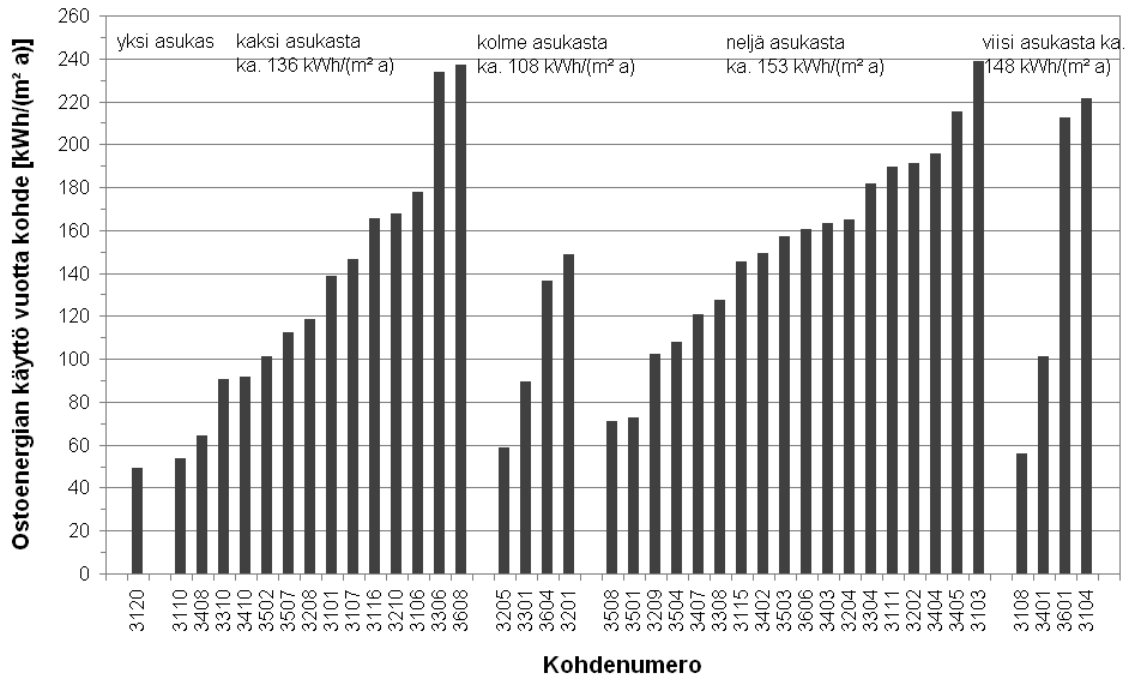
Ostoenergiankulutuksella tarkoitetaan vuotuista energiamäärää, joka tuodaan rakennukseen sähköinä, kaukolämpönä tai polttoaineena. Ostoenergia ilmoitetaan yksikössä kWh/(m² a). Kulutuslukemien saattamiseksi yhteismitallisiksi, käytetyn sähköenergian ja öljystä saadun lämmön summasta 40 %:n osuuden on arvioitu riippuvan ulkolämpötilasta. Öljy- ja puulämmitteisistä taloista on tässä yhteydessä huomioitu vain ne, joista myös sähkön käyttö on ollut tiedossa. Kaukolämpöä käyttävät talot on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, sillä tiedot niiden kaukolämpöverkosta ottamasta energiasta ovat puutteelliset. Edellä mainittu 40 %:n osuus on korjattu ilmastolliseen vertailukauteen 1971–2000 ja valtakunnalliseen vertailupakkakuntaan, Jyväskylään, Ilmatieteen laitoksen määrittämällä vuosi- ja kuntakohtaisilla lämmitystarveluvuilla (Venäläinen et al. 2004). Tähän korjattuun lukuarvoon on lisätty korjaamaton osuus (60 %) edellä mainitusta sähköenergian ja öljyn käytöstä. Nämä ulkolämpötilan ja maantieteellisen sijainnin suhteen yhteismitallisiksi saatetut luvut ovat vuoden 2004 osalta keskimäärin 6,3 % ja vaihteluväliltään 5,3–12,7 % suurempia kuin niitä vastaavat korjaamattomat luvut. Vuoden 2005 osalta ne ovat keskimäärin 7,9 % ja vaihteluväliltään 6,1–12,0 % suurempia. Molemmat vuodet ovat siten olleet keskimäärin ilmastollista vertailukautta lämpimämpiä. Edellä kuvattu korjattu ostoenergiankulutus on jaettu ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella tilavuudella ja lattiapinta-alalla. Nämä kaksi kunkin kohteen kokonaisenergian käyttöä kuvaavaa ominaisarvoa on esitetty suuruusjärjestyksessä kuvassa 2.8.3. Näissä luvuissa ei ole mukana polttopuun käyttöä.



Kuva 2.8.3 Pientalojen vuotuinen ulkolämpötilan ja maantieteellisen sijainnin suhteen korjattu ostoenergian käyttö ilmanpitävän vaipan sisäpuolista tilavuutta ja lattiapinta-alaa kohden. Luvuissa ei ole otettu huomioon polttopuun käyttöä.

Kuvasta 2.8.3 nähdään, että ostoenergian käyttö vaihtelee voimakkaasti eri koekohteiden välillä. Suurimmat energiankulutukset pinta-alaan suhteutettuna olivat noin viisinkertaiset ja tilavuuteen suhteutettuna noin nelinkertaiset alhaisimpiin kulutuslukemiin nähden. Tilavuutta kohti tehtyjen tarkastelujen pienempi hajonta johtuu mm. koekohteiden erilaisista huonekorkeuksista (esim. kahden kerroksen korkuiset tilat). Samanlainen tulos saatiin aiemmin myös puurunkoisissa pientaloissa tehdyssä tutkimuksessa (Vinha et al. 2005). Kaikki tutkimuksessa olleet pientalot olivat kuitenkin suhteellisen uusia, joten koekohteiden vaipan lämmöneristyksessä ei ollut todennäköisesti suuria eroja.

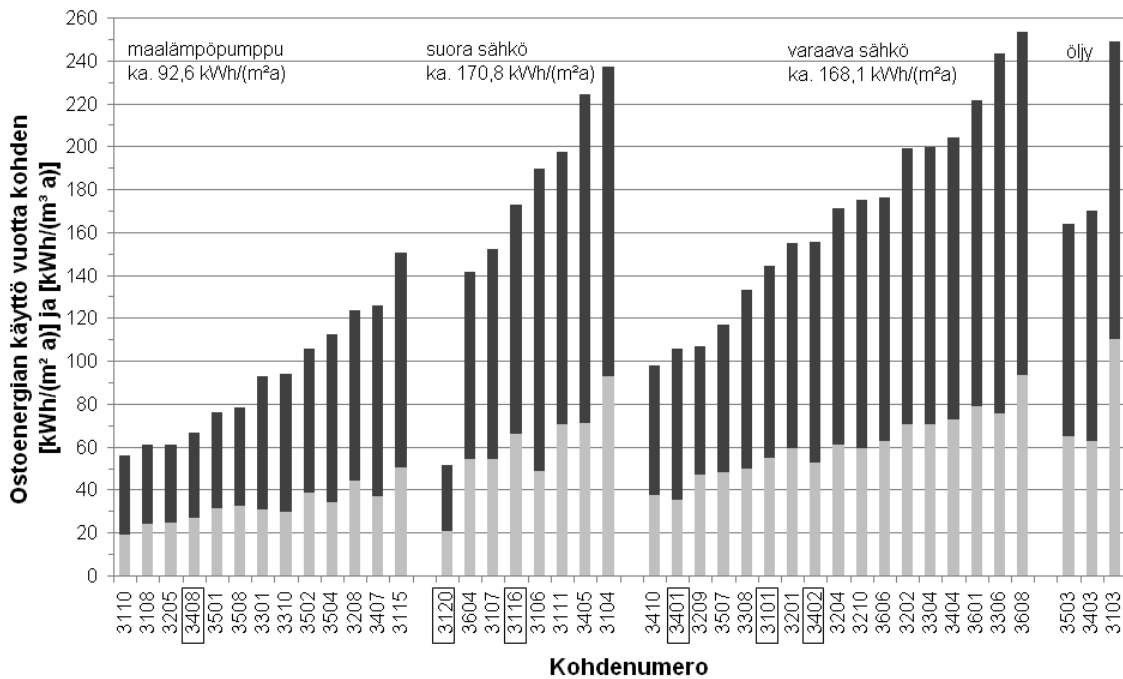
Kuvassa 2.8.4 on koekohteiden ilmastolliseen vertailukauteen korjattu ominaiskulutus (pinta-alan suhteen) ryhmitelty asukasmäärän mukaan. Keskimäärin kahden asukkaan talouksissa ostoenergiaa kului hieman vähemmän kuin neljän asukkaan talouksissa, mutta on huomattava, että kulutuksen hajonta oli kaikissa ryhmissä suuri.



Kuva 2.8.4 Pientalojen vuotuinen ulkolämpötilan suhteen korjattu ostoenergian käyttö asukasluvun mukaisesti luokiteltuna ja lattiapinta-alalla jaettuna. Luvuissa ei ole otettu huomioon polttopuun käyttöä.

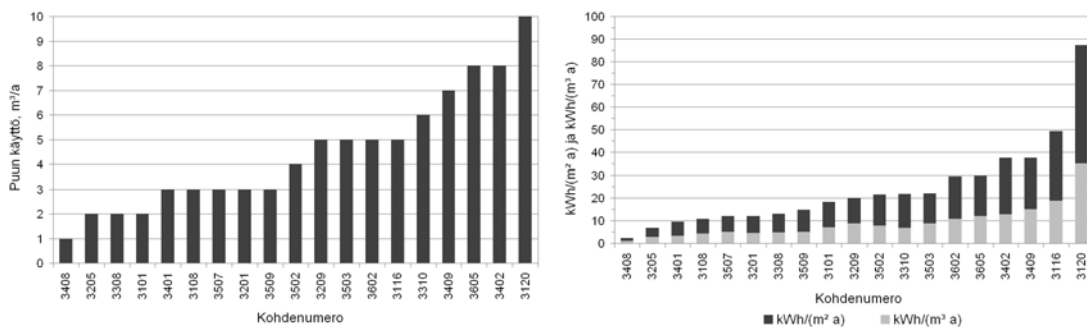
Kuvan 2.8.4 perusteella voidaan todeta, että myöskään asukasmäärän vaihtelu ei selitä pientaloissa havaittuja suuria energiankulutuseroja. Suurimpana selittävänä tekijänä onkin todennäköisesti asukkaiden erilaiset asumistottumukset.

Keskimääräinen lämmitystarveluvuilla ja maantieteellisellä sijainnilla korjattu ostoenergiankulutus vuodessa oli pääasiallisesti maalämpöpumpulla lämpiävissä kohteissa 92,6 kWh/m² (32,5 kWh/m³), suoralla sähköllä lämpiävissä kohteissa 170,8 kWh/m² (59,7 kWh/m³) ja varaavalla sähkölämmityksellä lämpiävissä kohteissa 168,1 kWh/m² (60,5 kWh/m³). Kohteiden ostoenergiankulutus pääasiallisen lämmitysjärjestelmän mukaan jaoteltuna on esitetty kuvassa 2.8.4. Luvut eivät sisällä polttopuun käyttöä.



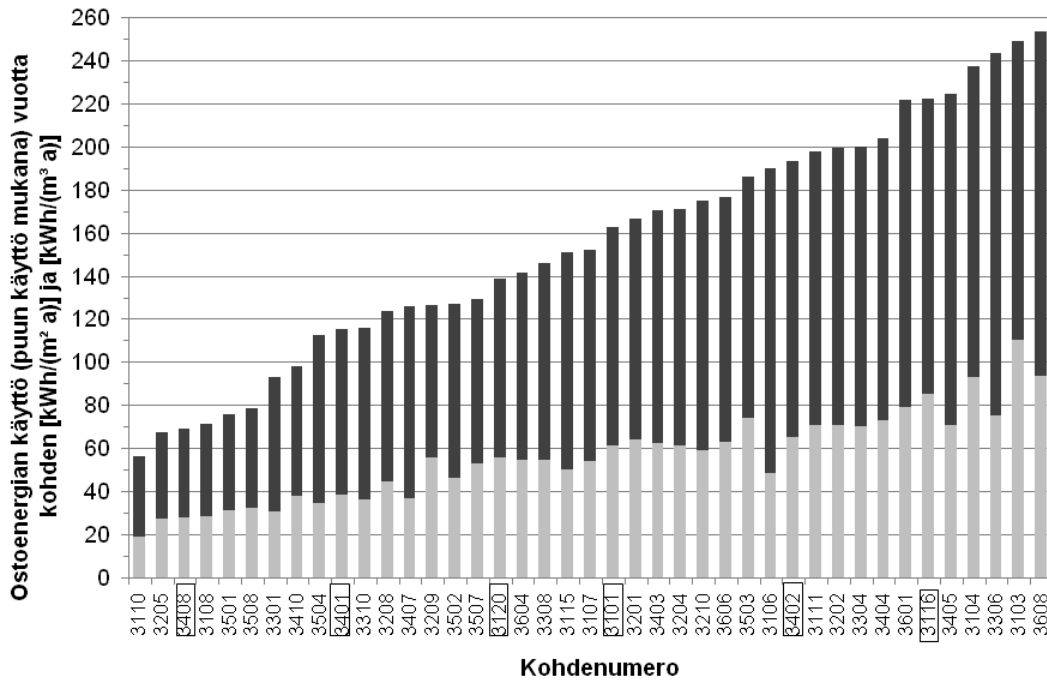
Kuva 2.8.5 Pientalojen vuotuinen ulkolämpötilan ja maantieteellisen sijainnin suhteen korjattu ostoenergian käyttö pääasiallisen lämmitysjärjestelmän mukaisesti luokiteltuna ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella tilavuudella ja lattiapinta-alalla jaettuna. Luvuissa ei ole otettu huomioon polttoainetta.

Asukaskyselylomakkeessa ei ole energian käytön näkökulmasta tarkemmin eritelty poltetun puun laatua ja polttotapaa tai puiden pinoamistapaa tilavuusyksikköön. Lisäksi kaikista niistä kohteista joissa puun polttaminen oli ilmoitettu yhdeksi lämmitystavaksi, ei asukastietolomakkeeseen ollut kirjattu käytettyä polttopuutilavuutta. Puun käyttö on tämän osion tarkastelussa katsottu kaikkien kohteiden osalta pääosin satunnaisesti, ei niinkään rakennuksen suunnitelmalliseen lämmittämiseen tähtääväksi (puun käyttöä ei ole korjattu lämmitystarveluvuilla). Kuvassa 2.8.6 on esitetty vasemmalla asukaskyselylomakkeesta saatu puun vuotuinen puun käyttö kuutioina ja oikealla arvio puusta poltettaessa vapautuneesta energiasta jaettuna rakennuksen ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella lattiapinta-alalla ja tilavuudella; asukkaiden ilmoittama polttopuutilavuus on katsottu poltetuksi puupolttoaineita käyttävässä lämmöntuottolaitteessa 70 % vuosihyötysuhteella.



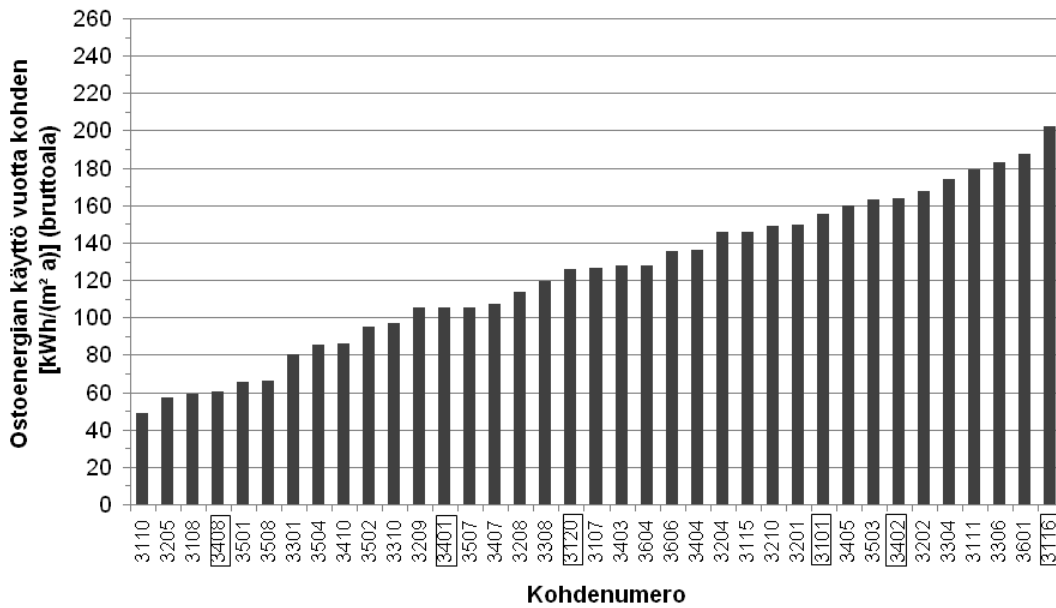
Kuva 2.8.6 Asukaskyselylomakkeesta saatu vuotuinen puun käyttö (vasemmalla) ja arvio puusta poltettaessa vapautuneesta energiasta (70 % vuosihyötysuhteella) jaettuna rakennuksen ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella lattiapinta-alalla ja tilavuudella.

Kuvassa 2.8.7 on esitetty koeobjektien vuotuinen ostoennerian käyttö siten, että lukuihin on otettu huomioon myös polttopuun käyttö kuvan 2.8.6 mukaisesti. Kuvasta huomataan, että polttopuun käyttökään ei selitä ominaisenergiankulutuksen suuria eroja eri koeobjektien välillä.



Kuva 2.8.7 Pientalojen vuotuinen ostoennerian käyttö, kun puun kulutus on laskettu mukaan, jaettuna rakennuksen ilmanpitävän vaipan sisäpuolisella lattiapinta-alalla ja tilavuudella.

Energiatohokkuuslukua laskettaessa rakennuksen pinta-alana käytetään bruttoalaa, josta on vähennetty rakennuksen lämmittämättömien tilojen pinta-ala. Kuvassa 2.8.8 on vertailuna esitetty kuvan 2.8.7 mukaiset ostoennerian käytön tulokset vuotta kohden osalle koeobjektista, kun pinta-alana on rakennuksen energiatohokkuusluvun mukainen pinta-ala.



Kuva 2.8.8 Pientalojen vuotuinen ostoenergian käyttö (puun kulutus on laskettu mukaan) jaettuna rakennuksen energiatodistusta varten lasketulla bruttoalalla.

2.8.3 Tulosten vertailu

Tampereen teknillinen yliopisto ja Teknillinen korkeakoulu tutkivat vuosina 2002–2004 puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita, ilmanvaihtoa ja ilmatiiviyyttä (Vinha et al. 2005). Tutkimuksessa asukkaiden energian käyttöä kartoitettiin samaan tapaan kuin nyt tehdyssä tutkimuksessa eli asukkaiden täyttämällä asukastietolomakkeilla. Energian käytön osalta kysymykset olivat yhteneviä tämän tutkimuksen kanssa. Puurunkoisten pientalojen keskimääräiseksi vuotuiseksi energian käytöksi saatiin edellä mainitussa tutkimuksessa sähkölämmitteisissä taloissa 145 kWh/m² ja lämpöpumpulla lämpiävissä taloissa 110 kWh/m². Tässä tutkimuksessa ominaiskulutukset olivat sähkölämmitteisissä taloissa (suora ja varaava sähkölämmitys yhdistettyinä) 169 kWh/m² ja lämpöpumpulla lämpiävissä 93 kWh/m². Näissä kahdessa tutkimuksessa tarkasteltujen rakennusten energian käyttöä kuvaavia tunnuslukuja on koottu taulukoon 2.8.2. Tuloksia vertailtaessa ja yleistettäessä on otettava huomioon, että kyseessä eivät ole täysin satunnaiset otokset siitä perusjoukosta, jonka tutkimuksen kohteeksi rajatut rakennuskannan osat muodostavat.

Taulukko 2.8.2 Puurunkoisten pientalojen (Vinha et al. 2005) ostoenergian käytön vertailu massiivirakenteisiin pientaloihin (AISE-tutkimus).

	Vinha et al. 2005		AISE-tutkimus	
	sähkölämmitys kWh/(m ² a)	lämpöpumppu kWh/(m ² a)	sähkölämmitys kWh/(m ² a)	lämpöpumppu kWh/(m ² a)
keskiarvo	145	110	169	93
keskihajonta	48	35	50	30
pienin kulutus	53	67	51	56
suurin kulutus	263	203	253	151

Energiatodistusta varten määritettävä energiankulutus lasketaan alle kuudesta asunnosta koostuvalle asuinrakennukselle aina RakMK D5:ssä (2007) esitetyllä laskentamenetelmällä vyöhykkeen III (Jyväskylä) säätiedoilla. Energiatehokkuusluku määritetään energiankulutuksesta jakamalla kulutus rakennuksen bruttoalalla. Tässä tutkimuksessa rakennuksen alaa kuvaavana lukuna on käytetty kohteen ilmanpitävän vaipan sisäpuolista lattiapinta-alaa, joka on jonkin verran pienempi kuin rakennuksen bruttoala. Lisäksi energian käyttöä kuvaavat luvut perustuvat tässä tutkimuksessa asukkaiden ilmoittamiin toteutuneisiin kulutuksiin. Nämä luvut on saatettu yhdenmukaisiksi samalla tavalla kuin energiatodistusta laadittaessa, korjaamalla ne Ilmatieteen laitoksen määrittämällä lämmitystarveluvuilla ja maantieteellisillä korjauskertoimilla Jyväskylään ja ilmastolliseen vertailukauteen 1971–2000. Jos tässä tutkimuksessa määritetyt energian käyttöä kuvaavat ominaisluvut (kWh/(m²a) normitetaan bruttopinta-alalla laskettuihin ominaislukuihin, ne pienenevät jonkin verran. Kun näitä lukuja verrataan energiatodistuksessa käytettyihin energiaterhoisuuslukuihin (ET-luku, kWh/br-m²) ja energiaterhoisuusluokkiin, sijoittuisivat sähkölämmitteisen talot keskimäärin luokkaan B ($151 \leq ET \leq 170$) ja pääasiallisesti lämpöpumpulla lämpiävät talot keskimäärin luokkaan A ($150 \leq ET$). Koska lämpöpumppuja ei energiatodistuksen laskentamenetelmässä oteta huomioon, sijoittuisivat nämäkin talot kuitenkin luokkaan B.

2.9 Asukaskyselyn tuloksia

Asukaskysely toteutettiin pientaloissa liitteen 3 mukaista asukaskyselyä käyttäen. Kerrostaloasuntoja varten kyselyä (liite 4) täydennettiin TKK/LVI-tekniikan muissa kerrostalokohteissa käyttämällä ns. HOPE-asukaskyselyllä.

Pientaloja oli mukana kyselyssä yhteensä 70, joista 20 oli hirsirunkoisia ja 50 kivirunkoisia. Vastauksia asukaskyselyyn saatiin yhteensä 70 kappaletta. Kerrostaloasuntoja oli mukana 56 asuntoa, joista 16 sijaitsi puukerrostaloissa ja 40 betonikerrostaloissa. Vastauksia asukaskyselyyn saatiin 37 asunnosta yhteensä 49 kappaletta. Osa vastauksista oli puutteellisesti täytettyjä eli vastausten lukumäärää vaihtelee kysymyksestä toiseen.

Tilastollisina testeinä käytettiin t-testiä keskiarvojen vertailussa ja χ^2 -testiä suhteellisten osuuksien vertailuun. Ongelmatalojen sisäilmastoa verrattiin myös niiden talojen sisäilmaan, joissa ei esiintynyt kyseistä ongelmaa.

Vertailuaineistoina käytettiin pientalojen osalta 100 pientalon otosta (Vinha et al. 2005) sekä kerrostalojen osalta TKK/ LVI-tekniikalle kertynyttä 600 kerrostaloasukkaan HOPE-lomakkeella tehtyä tietokantaa (Palonen et al. 2005 ja 2007).

2.9.1 Pientalot

2.9.1.1 Asumistottumukset

Ikkunatuuletus

Pientaloja tuuletettiin yleensä harvoin, alle kerran viikossa (55 %). Seuraavaksi yleisintä oli tuuletus 1–3 kertaa viikossa (25 %) ja lähes päivittäin tuuletettiin 20 % taloista. Tyypillisin tuuletuksen kesto oli 2–10 minuuttia tai 10–30 minuuttia kerralla.

Tärkein syy tuuletukseen oli selkeästi ilman kuumuus. Ilman tunkkaisuus, ruuan valmistus ja siivous olivat toiseksi tärkeimmät syyt tuuletukseen.

Vanhempien ja lasten makuuhuoneen tuuletusikkunat pidettiin raollaan 70 %:ssa pientaloista. Aikuisten ja lasten makuuhuoneiden ovi pidettiin avoimena öisin lähes 80 %:ssa pientaloja.

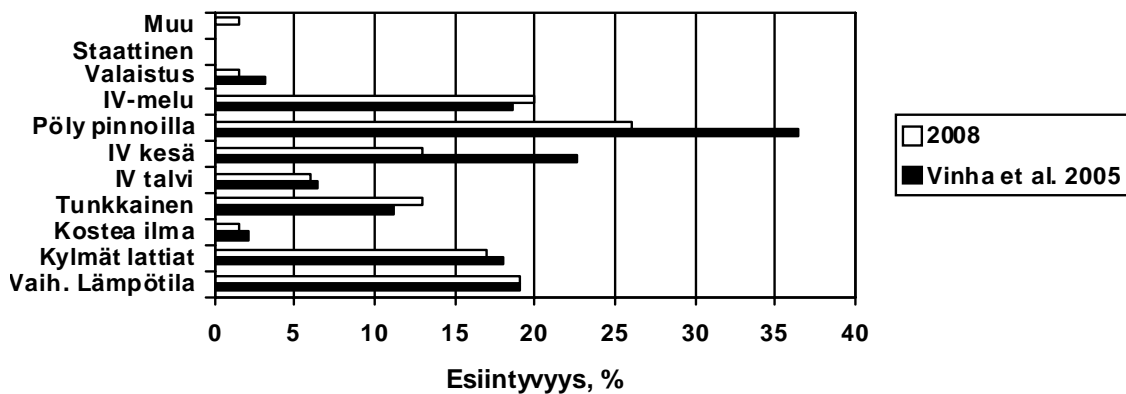
Saunan ja suihkun käyttö

Ilmankostuttimia oli kahdessa asunnossa. Enemmistö asukkaista kuivatti pyykkiä asunnossa 3–7 kertaa viikossa. Asukkaiden mielestä pyykki kuivui nopeasti tai kohtalaisen nopeasti.

Suihkua käytettiin vähintään päivittäin tai useamman kerran päivässä. Saunaa käytettiin yleensä pari kertaa viikossa. Kondenssikuivain oli 40 %:ssa talouksista. Kivirakenteisissa pientaloissa esiintyi huurtumista ulkoikkunan sisäpinnassa (15 %).

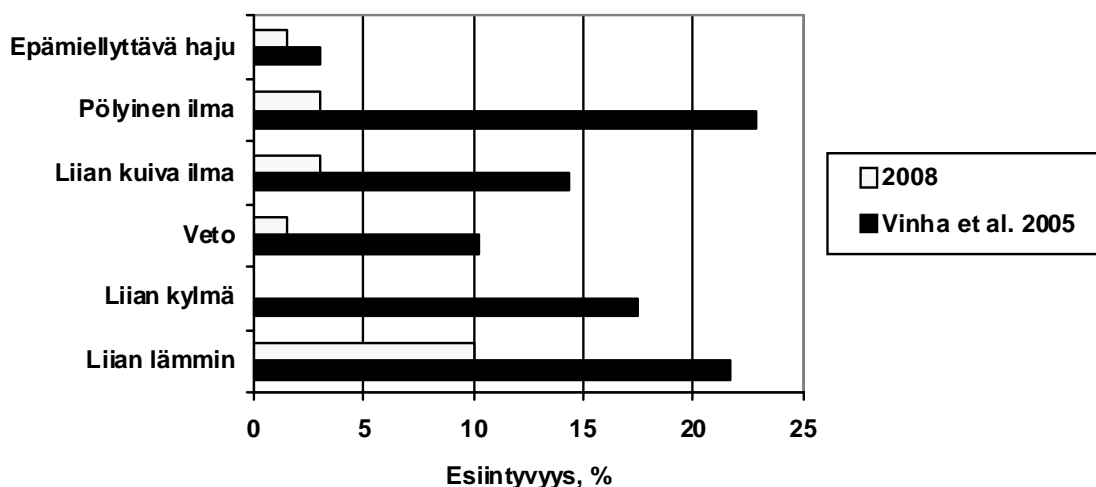
2.9.1.2 Sisäilmasto-ongelmat

Selkeästi yleisimmäksi sisäilmasto-ongelmaksi koettiin pölyiset pinnat (kuva 2.9.1). Kuvassa on verrattu tämän tutkimuksen tuloksia (2008) aiemman projektin puurunkoisten pientalojen tuloksiin (Vinha et al. 2005). Pintojen pölyntyminen on tunnettu koneelliseen tulo-poistoilmanvaihtoon liitetty ns. haittatekijä. Ilmiö aiheutunee suuremmista hiukkasten depositiokertoimista sisäänpuhallusta käytettäessä. Depositiokerroin kuvaa ilmassa leijuvien pölyhiukkasten poistumisnopeutta tilasta. Mitä isompi hiukkanen on, sitä suurempi on depositiokerroin. Depositiokerroin ilmaistaan kuten ilmanvaihtokerroin 1/h (huonekorkeus on tiedossa) tai yksikössä m^2/s . Raskaat hiukkaset laskeutuvat niin nopeasti, ettei huoneilmasuodattimilla ole vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuteen. Lopputuloksena on puhtaampi huoneilma samalla ilmamäärällä kuin muita ilmanvaihtoratkaisuja käytettäessä eli ilma on puhtaampaa, koska pöly poistuu siitä laskeutuessaan pinnoille. Riittämätön ilmanvaihto kesällä ja ilmanvaihtomelu olivat yleisimmät ilmanvaihtoon liittyvät ongelmat. Kylmät lattiat ja vaihteleva huonelämpötila olivat keskeiset lämpöolo-ongelmat.



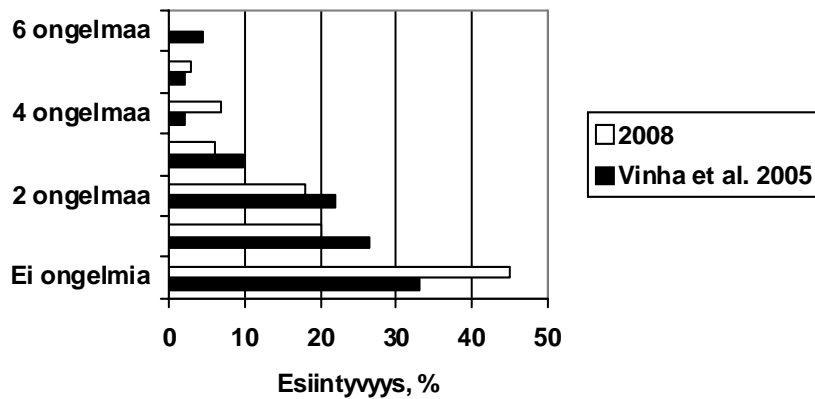
Kuva 2.9.1 Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys (prosenttia koekohteista) puurunkoisissa pientaloissa (2005) ja massiivirakenteisissa pientaloissa (2008).

Kuvassa 2.9.2 on esitetty vähintään kerran viikossa esiintyvien sisäilmasto-ongelmien yleisyys. Pölyinen ja liian lämmin huoneilma oli yleisin useasti esiintyvä sisäilmaongelma.



Kuva 2.9.2 Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys kerran viikossa tai useammin (prosenttia koekohteista).

Lähes puolessa pientaloja ei esiintynyt ollenkaan sisäilmasto-ongelmia (kuva 2.9.3). Toisaalta moniongelmaisista asunnoista oli noin viidesosa.



Kuva 2.9.3 Sisäilmasto-ongelmien keskittyneisyys (prosenttia koekohteista).

Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys oli hieman alhaisempi kuin 100 puurunkoisen pientaloasunnon tutkimuksessa. Merkittävin lasku oli pölyisten pintojen ja kesäajan riittämättömän ilmanvaihdon esiintyvyydessä. Ilmanvaihtomelun esiintyvyys kasvoi hieman, mutta toisaalta koneellisten tuloilmajärjestelmien osuus otoksessa kasvoi 61 %:sta lähes 100 %:iin edelliseen tutkimukseen verrattuna. Vähintään kerran viikossa esiintyvien sisäilmaongelmien esiintyvyys oli selvästi alhaisempi tässä tutkimuksessa, kuin 100 puurakenteisen pientalon tutkimuksessa.

Hirsi- ja kivirakenteisten talojen väliset erot olivat pieniä ja vaihtelevia. Kivirakenteisissa taloissa ilma koettiin tunkkaisemmaksi (18 %) kuin hirsitaloissa (0 %). Hirsitaloissa esiintyi vähemmän valituksia ilmanvaihtomelusta (5 %) kuin kivitaloissa, vaikka lähes kaikissa hirsitaloissa oli koneellinen ilman sisäänpuhallus.

Rakennusten ilmatiiviys ja sisäilmaongelmat

Trendianalyseissä asunnon hataruuden eli ilmapuotoluvun kasvu korreloi sekä lattioiden kylmyyden että vaihtelevan huonelämpötilan kanssa. Selitysasteet olivat 25 %:n luokkaa. Selitysaste kertoo kuinka suuren osan tuloksista sovitesuora tai -käyrä selittää. Jos kaikki havainnot ovat suoralla, niin selitysaste on 100 % ja jos muuttuja ei selitä havaintoja niin selitysaste on 0 %. Erityisesti ilmapuotoluvun ylittäessä 3,0 l/h 80 % asukkaista ilmaisi kylmiin lattioihin tai vaihtelevaan huonelämpötilaan liittyviä ongelmia.

Ilmanvaihtokerroin ja sisäilmasto-ongelmat

Tunkkaisuus yleistyi ilmanvaihtokertoimen laskiessa ja vetoisuus yleistyi ilmanvaihtokertoimen suurentuessa. Selitysasteet olivat kuitenkin vain muutaman prosentin suuruusluokkaa.

Ilmanvaihtomelu

Aiemmassa 100 puurunkoisen pientalon tutkimuksessa ilmanvaihtomeluongelman esiintyvyys kasvoi makuuhuoneiden äänitason kasvaessa. Määrävänä tekijänä oli ilmanvaihdon aiheuttama äänitaso maksimi-ilmavirralla. Tässä tutkimuksessa saatiin yhteensä vain 40 havaintoa, joissa oli sekä äänitasomittaus että asukkaiden arvio ilmanvaihtomelun häiritsevyydestä. Näistä vain viidessä tapauksessa (12,5 %) ilmanvaihtomelu koettiin ongelmaksi. Trendianalyysit osoittivat ilmanvaihtomeluongelman yleistyvän sekä maksiminopeudella makuuhuoneissa mitatun äänitason kasvaessa että ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmanvaihtokertoimen kasvaessa. Selityksasteet olivat kuitenkin vain muutamia prosentteja.

Taulukossa 2.9.1 on esitetty mitatut äänitasot makuuhuoneissa eri ilmanvaihdon käyntinopeuksilla asunnoissa, joissa valitettiin ilmanvaihtomelusta ja asunnoissa, joissa ei valitusta esiintynyt. Valitusasunnoissa ilmanvaihdon äänitaso oli hieman korkeampi kuin muissa asunnoissa.

Taulukko 2.9.1 Ilmanvaihdon aiheuttamat äänitasot makuuhuoneissa. Pientalot, joissa valitettiin ilmanvaihtomelua ja pientalot, joissa ei valitettu ilmanvaihtomelusta.

Ryhmä	äänitaso miniminopeudella	äänitaso käyttönopeudella	äänitaso maksiminopeudella
Pientalot, joissa ei ole ilmanvaihtomelua	19 dB(A)	20 dB(A)	25 dB(A)
Pientalot, joissa on ilmanvaihtomelua	19 dB(A)	21,8 dB(A)	26,4 dB(A)

2.9.2 Kerrostalot

2.9.2.1 Asumistottumukset

Ikkunatuuletus

Asukkaista 18 % ilmoitti tuulettavansa perusteellisesti harvemmin kuin kerran viikossa. Päivittäin tuuletettiin kahdessa kolmasosassa asuntoja. Tyypillisin tuuletuksen kesto oli 10–30 minuuttia tai vähintään puoli tuntia. Kaikki kyselyyn vastanneet ilmoittivat tuuletusajaksi yli kaksi minuuttia.

Tärkein syy tuuletukseen oli selkeästi ilman kuumuus. Puukerrostaloissa ilman kuumuus oli kaikilla vastaajilla ensisijainen syy tuuletukseen. Siivous oli toiseksi tärkein syy tuuletukseen.

Vanhempien makuuhuoneen tuuletusikkuna pidettiin aina suljettuna yöaikaan 40 %:ssa kerrostaloasunnoista, 60 %:ssa asunnoista sitä pidettiin raollaan kesällä. Lasten makuuhuoneen tuuletusikkunat olivat kiinni yöaikaan 60 %:ssa lapsiperheiden asunnoista. 40 %:ssa asunnoista niitä pidettiin raollaan kesäisin. Aikuisten makuuhuoneen ovi oli öisin auki 75 %:ssa asunnoista. Lasten makuuhuoneiden ovi oli avoinna 80 %:ssa asunnoista.

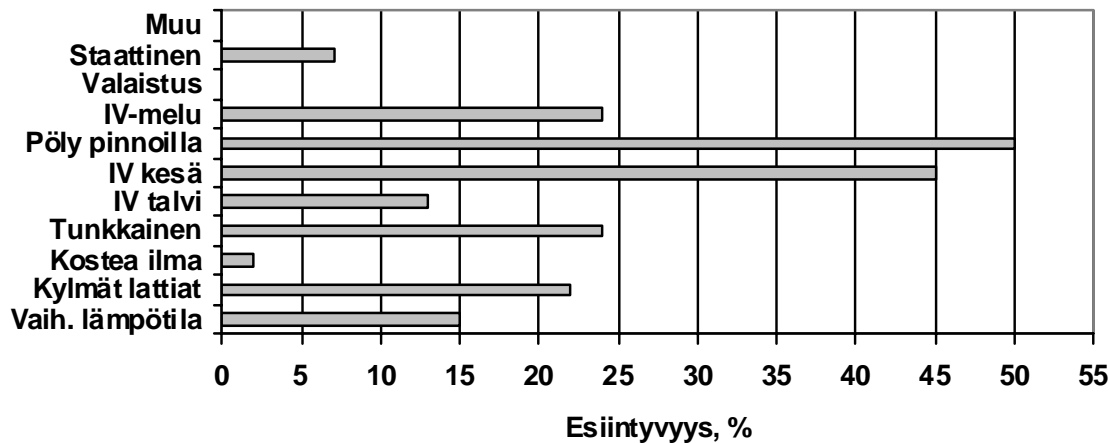
Saunan ja suihkun käyttö

Ilmankostuttimia oli kuudessa asunnossa. Ilmankostuttimista puolet sijaitsi makuuhuoneissa ja puolet olohuoneissa. Enemmistö asukkaista kuivatti pyykkiä asunnossa 3–4 kertaa viikossa. Asukkaiden mielestä puukerrostaloissa pyykki kuivui hitaammin. Kondenssikuivaaja oli viidessä kylpyhuoneessa.

Suihkua käytettiin päivittäin tai useamman kerran päivässä. Puukerrostaloissa asunosaunoja oli vähän. Saunaa käytettiin yleensä kerran viikossa, jonkin verran myös kahdesti viikossa. Ikkunoiden huurtumista esiintyi talvella puukerrostaloissa (33 % kohteista) enemmän kuin betonikerrostaloissa (8 %). Huurtumista esiintyi sekä sisäikkunassa että ulkoikkunan sisäpinnassa.

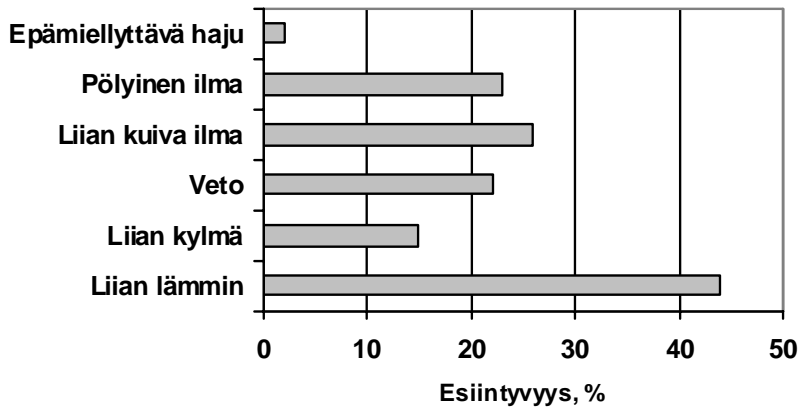
2.9.2.2 Sisäilmasto-ongelmat

Selkeästi yleisimmäksi sisäilmasto-ongelmaksi kerrostaloasunnoissa koettiin pölyiset pinnat sekä ilmanvaihdon riittämättömyys kesällä (kuva 2.9.4). Pintojen pölyntyminen on tunnettu koneelliseen tulo-poistoilmanvaihtoon liitetty ns. haittatekijä. Ilmiö aiheutunee suuremmista hiukkasten depositiokertoimista sisäänpuhallusta käytettäessä. Lopputuloksena on puhtaampi huoneilma samalla ilmamäärällä kuin muita ilmanvaihtoratkaisuja käytettäessä. Riittämätön ilmanvaihto kesällä, ilman tunkkaisuus, ilmanvaihtomelu ja kylmät lattiat olivat lisäksi vähintään 20 prosentin yleisyydellä esiintyneet ongelmat.



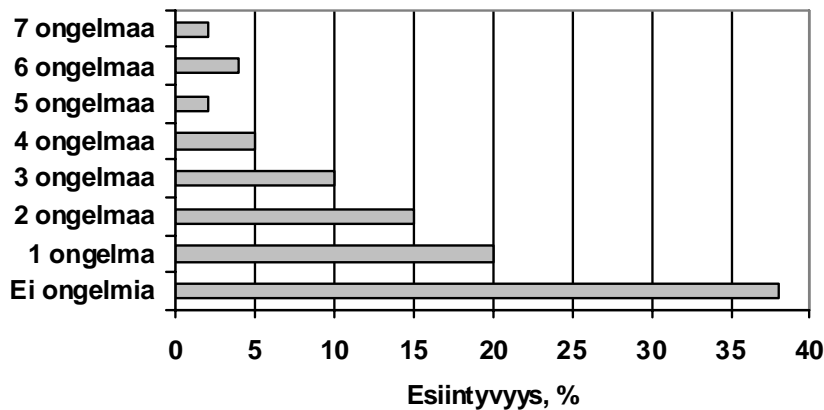
Kuva 2.9.4 Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys (prosenttia koekohteista).

Kuvassa 2.9.5 on esitetty vähintään kerran viikossa esiintyvien sisäilmasto-ongelmien yleisyys. Ilman lämpimyyttä oli keskeinen useasti esiintyvä ongelma. Ilman pölyisyys, kuivuus ja veto olivat seuraavat usein esiintyvät ongelmat.



Kuva 2.9.5 Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys kerran viikossa tai useammin (prosenttia koeobjekteista).

Lähes 40 %:ssa asunnoista ei esiintynyt ollenkaan sisäilmasto-ongelmia (kuva 2.9.6). Toisaalta moniongelmaisista asunnoista oli noin viidesosa.



Kuva 2.9.6 Sisäilmasto-ongelmien keskittyneisyys (prosenttia koeobjekteista).

Lattioiden kylmyyttä (87 %) ja vaihtelevaa huonelämpötilaa (70 %) esiintyi huomattavan yleisesti puukerrostaloissa. Myös tunkkaisen ilman esiintyvyys oli 70 %:n tasoa. Pölyisiä pintoja ja ilmanvaihdon riittämättömyyttä esiintyi puukerrostaloissa enemmän kuin betonitaloissa. Puukerrostalot koettiin myös vetoisammiksi. Ilmanvaihtomelua esiintyi betonikerrostaloissa enemmän kuin puukerrostaloissa, koska koneellinen sisäänpuhallus oli yleisempi betonikerrostaloissa.

Haju- ja vetohaitat

Talvella merkittävimmäksi hajulähteeksi ilmoitettiin WC tai viemäri. Se kattoi puolet hajuongelmista. Muut merkittävät hajulähteet olivat ruuan valmistus ja tupakansavu. Kesällä WC:n ja viemäriin hajun merkitys kasvoi.

Lämmityksen säätömahdollisuuksien puuttuminen koettiin puutteeksi 37 %:n osalta vastaajista. Vetoisuuden mainitsi neljäsosa vastaajista. Viidesosa vastaajista piti ongelmana sitä, että lämmitysradiaattoreiden pinta on vain lämmin mutta ei kuuma ja sitä, etteivät radiaattorit lämpene tasaisesti eri huoneissa.

Vertailu HOPE-tutkimukseen

Vertailuaineiston muodostavat 600 kerrostaloasukkaan tiedot, jotka on saatu osittain samaa kyselylomaketta käyttäen. Euroopan Unionin rahoittamassa tutkimusprojektissa (HOPE Health and energy optimisation protocol) vuosina 2002–2005 on tutkittu yhdeksässä EU-maassa toimistorakennusten ja asuinkerrostalojen energiankäyttöä ja sisäilmastoa (Palonen et al. 2005 ja 2007). Projektin painopiste on ollut asukas- ja työntekijäkyselyiden sekä sisäilmastomittausten ja kyselyiden ohella arviointityökalujen kehittämisessä. Projektin koordinoijana toimi TNO Hollannista. Muita EU-maita olivat Suomi, Tanska, Saksa, Tsekki, Iso-Britannia, Italia ja Portugali. Sveitsi osallistui kansallisella rahoituksella projektiin. Suomesta projektiin osallistui 12 eri-ikäistä asuinkerrostaloyhtiötä. Kohteet olivat omistus-, asumisoikeus- ja vuokratalokohteita. Rakennus- tai peruskorjausvuosi vaihteli vuodesta 1953 vuoteen 2002. Tutkimuksen painopiste oli 1990-luvun lopussa rakennetuissa kerrostaloissa.

Taulukoissa 2.9.2 ja 2.9.3 on verrattu AISE-tutkimuksen ja HOPE-tutkimuksen asukaskyselyiden keskeisiä tuloksia kerrostalojen osalta. Keskimäärin tarkasteltuina lämpöolot koettiin AISE-tutkimuksessa huonommiksi, erityisesti kesällä selvästi kuumemmaksi, kuin HOPE-aineistossa. Toisaalta ilman laatu koettiin AISE-tutkimuksen kohteissa paremmaksi kuin HOPE-aineistossa. Asuntojen sisäilma koettiin raikkaammaksi ja hajuttomammaksi.

Taulukko 2.9.2 Puu- ja betonikerrostalojen keskinäinen vertailu ja vertailu HOPE-kerrostalojen tuloksiin talvikautena (1 on paras mahdollinen arvio ja 7 on huonoin mahdollinen)

Kysymys	AISE-tutkimus			HOPE
	Kaikki	Betonirunko	Puurunko	
Lämpötila talvella				
Miellyttävä – Epämiellyttävä	3,51	3,27	3,67	3,16
Tasainen – Vaihtelee päivän aikana	3,06	2,57	4,67	3,39
Lämpötila kesällä				
Miellyttävä – Epämiellyttävä	4,39	4,03	5,55	3,50
Tasainen – Vaihtelee päivän aikana	4,49	4,26	5,25	4,10
Ilman laatu talvella				
Raikas – Tunkkainen	3,30	3,07	4,12	3,40
Hajuton – Pahanhajuinen	2,58	2,55	2,67	3,00
Miellyttävä – Epämiellyttävä	2,65	2,55	3,12	4,20
Ilman laatu kesällä				
Raikas – Tunkkainen	3,61	3,48	4,00	3,45
Hajuton – Pahanhajuinen	2,58	2,41	3,11	3,06
Miellyttävä – Epämiellyttävä	3,34	3,07	4,11	3,08
LVI-melu talvi				
Hyväksyttävä – Ei hyväksyttävä	2,56	2,47	2,89	3,14
LVI-melu kesä				
Hyväksyttävä – Ei hyväksyttävä	2,82	2,66	3,33	2,44
Viihtyisyys talvella				
Tyytyväinen – Tyytymätön	2,56	2,42	3,12	2,59
Viihtyisyys kesällä				
Tyytyväinen – Tyytymätön	2,95	2,76	3,63	2,49
Asunnon sisäilman vaikutus terveyteen				
Edistää terveyttä – Aiheuttaa terveyshaittaa	3,57	3,55	3,62	3,64
Asunnon sisäilman vaikutus kykyyn työskennellä ja askarrella kotona				
Auttaa selvästi – Haittaa selvästi	3,43	3,39	3,63	3,55

AISE-tutkimuksen puu- ja betonikerrostaloissa asunnon arvioitiin edistävän terveyttä asteikolla 1 (edistää)–7 (haittaa) arvolla 3,57. Asunnon sisäilma auttaa kotiaskareissa asteikolla 1–7 arvolla 3,43. Betonirunkoisissa kerrostaloissa vastaavat arviot luvut olivat 3,55 ja 3,39. Puukerrostaloissa vastaavat arviot olivat 3,62 ja 3,63. HOPE-tutkimuksessa vastaavat arviot olivat 3,64 ja 3,55.

Keskimäärin asunnot koettiin terveyttä ja kotitöitä edistäväksi. Merkittäviä eroja puu- ja betonikerrostalojen välillä ei esiintynyt. Tulokset eivät poikenneet HOPE-tutkimuksen keskiarvoista.

Taulukko 2.9.3 Puu- ja betonikerrostalojen keskinäinen vertailu ja vertailu HOPE-kerrostalojen tuloksiin kesäkautena (4 on optimaalisin arvio, 1 ja 7 ovat huonoimmat mahdolliset)

Kysymys	AISE-tutkimus			HOPE
	Kaikki	Betonirunko	Puurunko	
Lämpötila talvella				
Liian kuuma – Liian kylmä	4,09	3,72	5,33	4,01
Lämpötila kesällä				
Liian kuuma – Liian kylmä	2,36	2,40	2,22	2,87
Ilman liike talvella				
Liian seisova – Liian liikkuva	4,02	4,03	4,00	4,07
Ilman liike kesällä				
Liian seisova – Liian liikkuva	2,86	2,92	2,67	2,99
Ilman laatu talvella				
Kuiva – Kosteaa	2,97	3,10	2,55	2,89
Ilman laatu kesällä				
Kuiva – Kosteaa	3,53	3,41	3,89	3,42

Puukerrostalot koettiin kylmemmiksi talvella kuin betonikerrostalot. Tämä aiheutui lähinnä yhdestä puukerrostalokohteesta, joihin ongelmat keskittyivät. Puukerrostaloissa koettiin ilman laatu huonommaksi kuin betonitaloissa (talvella ja kesällä). Keskimääräinen ilmanvaihtokerroin oli puukerrostaloissa 0,40 1/h ja betonitaloissa 0,57 1/h.

Puukerrostaloissa asunnon viihtyisyys koettiin huonommaksi kuin betonikerrostaloissa kesällä ja talvella.

2.9.2.3 Lämmityksen toiminta

Lämmityksen toiminta arvioitiin keskimäärin arvoksi 3,02 asteikolla 1 = tyytyväinen, 7 = tyytymätön. Betonikerrostaloissa arvio oli 2,80 ja puukerrostaloissa 3,88. HOPE-tutkimuksessa arvio oli 2,75. Puukerrostalojen joukossa oli yksi yhtiö, jossa neljän asunnon asukkaat ilmaisivat 3–9 erilaista lämmitykseen liittyvää ongelmaa. Nämä asunnot koettiin myös viileiksi talvella. Nämä asunnot selittävät puukerrostalojen lämpöolosuhdeongelmat lämmityskaudella.

3 Vuotoilmanvaihdon mallinnus

Vuotoilmanvaihdon mallinnuksen avulla tutkittiin rakennuksen vaipan ilmanpitävyyden vaikutusta rakennuksen keskimääräiseen vuotoilmanvaihtokertoimeen ja energiankulutukseen Suomen olosuhteissa. Tässä tutkimuksen osassa keskityttiin pääosin pientalojen vuotoilman mallinnukseen, mutta myös kerrostalon vuotoilmanvaihtuvuutta tutkittiin kahdessa yksittäisessä tapauksessa. Ilmanpitävyyden ja vuotoilmanvaihdon välinen yhteys määritettiin kokeellisesti validoidulla dynaamisella IDA-ICE -simulointimallilla. Mallin avulla tutkittiin lisäksi vuotoilmanvaihtoon keskeisesti vaikuttavien tekijöiden, kuten ilmasto- ja tuuliolojen, vuotojakauman, ilmanvaihtojärjestelmän tasapainon sekä rakennuksen korkeuden vaikutusta. Simulointitulosten perusteella kehitettiin yksinkertainen pientalon vuotoilmanvaihtokertoimen laskentamalli, joka ottaa huomioon vuotoilmanvaihtoon keskeisesti vaikuttavat tekijät.

3.1 Simulointimallin kokeellinen validointi

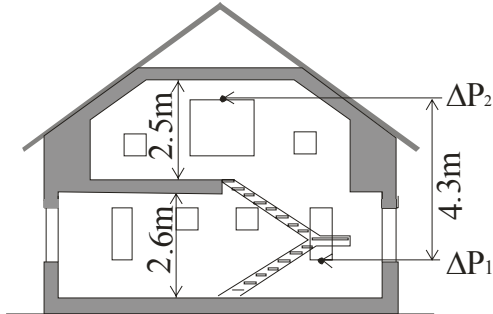
Simulointimallin soveltuvuutta vuotoilmanvaihdon laskentaan tutkittiin vertaamalla pientalon simulointimallin ennustamia painesuhteita mallinnuskohteesta mitattuihin painesuhteisiin. Mallinnuskohteeseen kuvaa tyypillistä kaksikerroksista suomalaista pientaloa (kuva 3.1.1). Kohde on vuonna 2000 pääkaupunkiseudulle rakennettu puurunkoinen höyrynsulkumuovilla varustettu talopakettitalo, jonka lämmöneristystaso vastaa voimassa olevien määräysten mukaista eristyskäytäntöä ja jossa on koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Mallinnuskohteeseen vastaa mm. rakennustavan, ilmanvaihtojärjestelmän ja ilmanvaihtuvuuden sekä ilmanpitävyyden osalta hyvin vuonna 2004 päättyneessä ”*Kosteusvarma terve pientalo*” -hankkeessa tutkitun sadan puurunkoisen pientalon perusteella valittua keskivertopientaloa (Vinha et al. 2005). Valitun mallinnuskohteen mitattu ilmavuotoluku n_{50} on yhtä suuri kuin em. hankkeessa määritetty puurunkoisten pientalojen keskiarvo 3,9 l/h.



Kuva 3.1.1 Vuotoilmanvaihdon mallinnuksessa käytetty tutkimuskohteeseen.

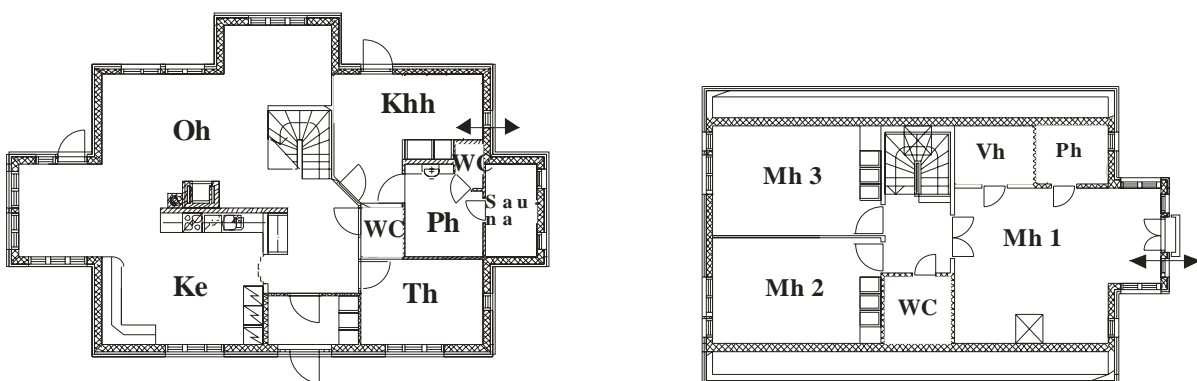
Mitatun ilmavuotoluvun lisäksi simulointimallin lähtötietoina käytettiin mitattuja tulo- ja poistoilmavirtoja. Mallinnuskohteeseen tehtiin lisäksi lämmityskaudella kolmen viikon seurantamittaus 4.–24.3.2005 lämpöolojen ja painesuhteiden selvittämiseksi. Seurantamittauksessa ulkolämpötila, ylä- ja alakerran sisälämpötilat sekä paine-erot ulkovaipan yli (kuvat 3.1.2 ja 3.1.3) mitattiin käyttäen 5 min aika-askelta. Seurantamittauksen ajan rakennus oli normaalissa käytössä. Lisäksi lämmityskaudella tutkittiin rakennuksen vaipan vuotoreittien sijaintia ja jakautumista vaipan eri osiin lämpökamerakuvauksen avulla.

Lämpökamerakuvaukset tehtiin lämmityskaudella rakennuksen sisällä, kun sisä- ja ulkolämpötilaero oli 25 °C. Aluksi rakennuksen vaippa kuvattiin normaaleissa paineoloissa, jonka jälkeen rakennus paineistettiin 50 Pa alipaineeseen, jolloin vaipan vuotokohdat voitiin paikallistaa. Lämpökamerakuvaukseen perustuva vuotojakauman arviointimenetelmä on esitetty tarkemmin esim. lähteessä (Jokisalo et al. 2008).

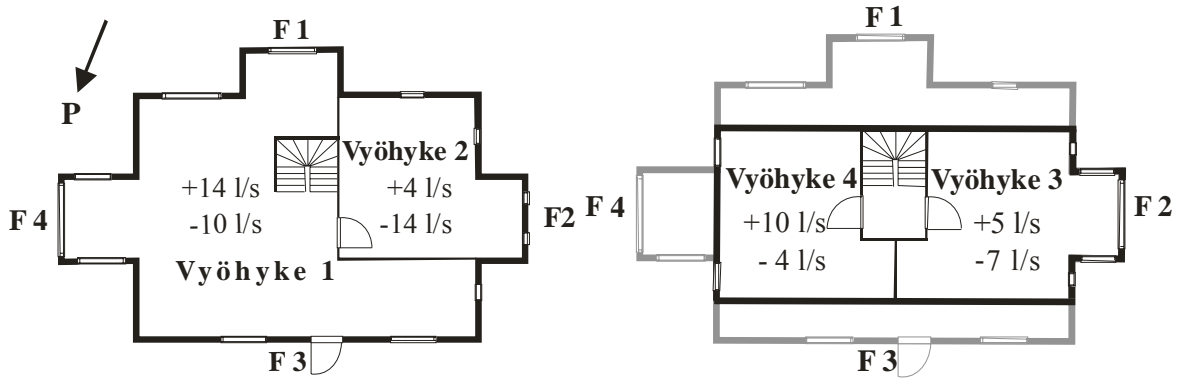


Kuva 3.1.2 Paine-erojen mittauspisteet koekohteessa.

Kohteesta tehtiin dynaaminen monivyöhykemalli (kuva 3.1.4) IDA-ICE -simulointiohjelmalla (Vuolle & Sahlin 2000), jolla simuloitiin seurantamittausta vastaava ajanjakso käyttäen mitattuja lähtötietoja. Mallin avulla tutkittiin, kuinka hyvin mallin ennustamat painesuhteet vastaavat mitattuja painesuhteita seurantamittauksen aikana, kun mallin lähtötiedoiksi annettiin mitatut lähtötiedot mukaan lukien mitattu vuotoreittien jakauma. Mallinnettu rakennuksen käyttö lämpöoloineen vastasi hyvällä tarkkuudella mitattua seurantajaksoa. Simuloinnissa käytettiin Ilmatieteen laitoksen mittaamia lähimmän sääaseman seurantajaksoa vastaavia säätietoja auringon säteily- ja tuulitietoineen sekä paikan päällä mitattua ulkoilman lämpötilaa. Rakennuksen ympäristön tuuliolosuhteet kuvattiin mallissa taajaman tuuliprofiilin ja tuulen painekertoimien avulla (Jokisalo et al. 2008).

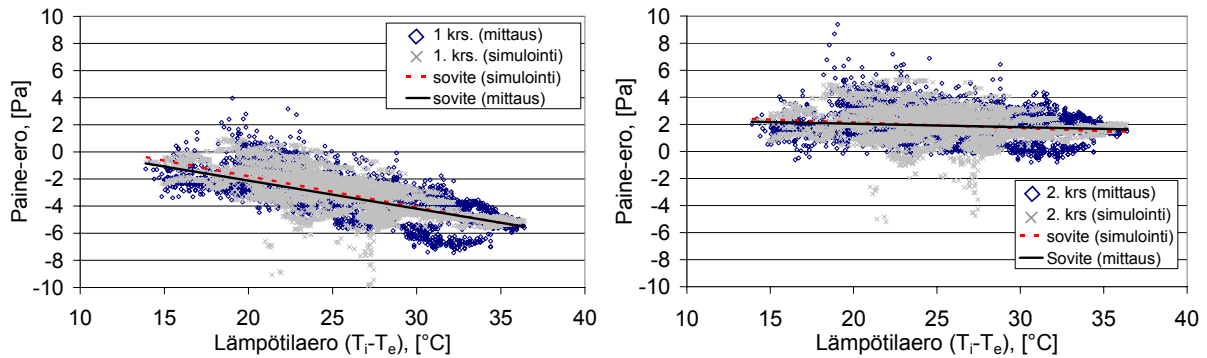


Kuva 3.1.3 Mallinnuskohteen pohjapiirustus alakerrasta (vasen) ja yläkerrasta (oikea). Kuvissa paine-erojenmittauskohdat on merkitty nuolilla.



Kuva 3.1.4 Mallin vyöhykejako alakerrassa (vasen) ja yläkerrassa (oikea). Mitatut ilmanvaihdon tuloilmavirrat on merkitty kuvaan (+) merkillä ja poistoilmavirrat (-) merkillä.

Seurantajaksoa vastaavat mitatut ja simuloitut painesuhteet on esitetty kuvassa 3.1.5. Lisäksi seurantajaksoa vastaavat keskimääräiset sisälämpötilat ja paine-erot on esitetty taulukossa 3.1.1. Seurantamittauksen perusteella rakennuksen 1. kerros on alipaineinen ja 2. kerros vastaavasti hieman ylipaineinen. Vertailun perusteella simulointimalli ennustaa varsin todenmukaisesti mallinnuskohteen painesuhteita, joten mallia voidaan käyttää kaksikerroksisen pientalon vaipan ilmapuotoluvun ja vuotoilmanvaihtokertoimen välisen yhteyden tutkimiseen seuraavissa jatkotarkasteluissa.



Kuva 3.1.5 Seurantajaksoa vastaavat simuloitut ja mitatut ulkovaipan paine-erot sisälämpötilan (T_i) ja ulkolämpötilan (T_e) erotuksen suhteen esitettynä alakerrassa (vasen) ja yläkerrassa (oikea).

Taulukko 3.1.1 Mitatut ja simuloitut keskimääräiset lämpöolot ja painesuhteet.

Menetelmä	Huonelämpötila [°C]		Paine-ero ulkovaipan yli [Pa]	
	1. krs.	2. krs.	1. krs.	2. krs.
Seurantamittaus	19,7	17,0	-3,3	1,9
Simulointi	19,8	17,0	-3,1	1,9

3.2 Vuotoilmanvaihtokertoimeen vaikuttavat tekijät

3.2.1 Tutkitut tapaukset

Pientalon vuotoilmanvaihtokertoimen riippuvuutta ilmavuotoluvusta tutkittiin simuloimalla luvussa 3.1 esitettyä mallia käyttäen yhden vuoden pituista simulointijaksoa. Simuloinnit tehtiin vuoden 1979 tunnittaisilla testi-sää tiedoilla (Tammelin & Erkiö 1987), joita käytetään yleisesti energialaskennan lähtötietoina. Tutkitut pientalon vuotoilmanvaihtoon vaikuttavat tekijät on esitetty taulukossa 3.2.1. Tarkasteluissa ilmavuotoluvulle n_{50} annettiin kolme eri vaihtoehtoa (0,15, 3,9 tai 10 l/h), joista 0,15 l/h kuvaa lähes täysin ilmanpitävää taloa, 3,9 l/h keskiverto puurunkoista pientaloa (Vinha et al. 2005) ja 10 l/h hataraa taloa. Vuotoilmanvaihtuvuutta tutkittiin erityyppisissä ilmasto-oloissa, jotka edustavat Suomessa rakennusten energialaskentaan määriteltyjä ilmastovyöhykkeitä I (Helsinki), III (Jyväskylä) ja IV (Sodankylä). Testivuoden keskilämpötilat tutkituilla ilmastovyöhykkeillä ovat: I (4,2 °C), III (2,8 °C) ja IV (-0,8 °C). Tuuliolojen vaikutusta tutkittiin simuloimalla rakennus suojaattomassa tuuliympäristössä, tyypillisessä maaseudun tuuliympäristössä, jossa on hiukan suojaavia puita tai rakennuksia, suojaisessa taajamaympäristössä tai täysin tuulettomassa ympäristössä. Ilmanvaihdon tasapainotuksen merkitystä tutkittiin täysin tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä sekä yli- ja alipaineisella järjestelmällä, jossa rakennuksen tuloilmamäärä oli joko 15 % suurempi tai pienempi kuin poistoilmamäärä rakennuksen ilmanvaihtokertoimen ollessa noin 0,5 l/h. Pientalon korkeuden vaikutusta tutkittiin myös 1-kerroksisen tapauksen avulla. Vuotojakauman vaikutusta tutkittiin 2-kerroksisen pientalon tapauksessa neljällä eri vuotojakaumalla, joista *tyypillinen*-jakauma vastaa mallinnuskohteen mitattua vuotojakaumaa. Tutkitut jakaumat on esitetty taulukossa 3.2.2 ja vuotoreittien tyypilliset sijainnit kuvassa 3.2.1.

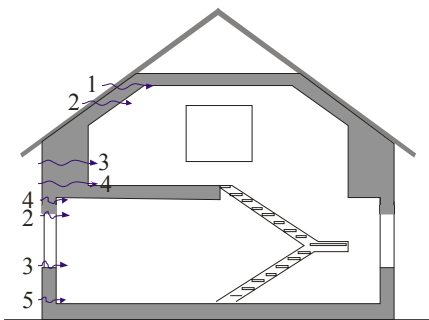
Vuotoyhtälön eksponentin (kaava 2.2.1) osalta simuloinnit suoritettiin pääosin käyttäen ”*Kosteusvarma terve pientalo*” hankkeessa sekä AISE-hankkeessa kerätyn 170 pientalon mittausaineiston keskiarvoa 0,73 (Jokisalo et al. 2007a). Tapauksiin otettiin mukaan myös vuotoyhtälön eksponentin tyypillinen vaihteluväli (0,63 ja 0,83) mittausaineiston perusteella. Mallinnuskohteen mitattu vuotoyhtälön eksponentti on 0,63. Vuotoyhtälön eksponentti on kokeellisesti (paineekoe) määritettävä epäfysikaalinen parametri, jonka arvo riippuu vuotorakojen koosta. Kun rakennuksen vaippa koostuu useista pienistä mahdollisesti pitkistä raoista, joiden virtausvastus on suuri, on ilmavirtaus tyypillisesti lähes laminaarista ja vuotoyhtälön eksponentti lähestyy arvoa 1. Vastaavasti suurten mahdollisesti lyhyiden vuotorakojen tapauksessa virtausvastus on pieni, jolloin virtaus on tyypillisesti turbulenttista ja vuotoyhtälön eksponentti lähestyy arvoa 0,5.

Taulukko 3.2.1 Tutkitut pientalon simulointitapaukset.

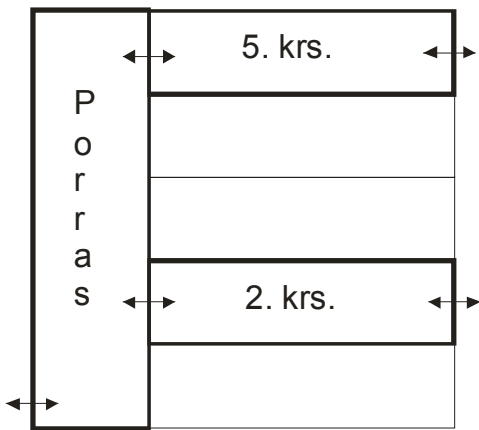
Sijainti	Tuuliolot	Vuotojakauma	Tulo/ poisto	Korkeus (krs. lkm.)	Vuotoyhtälön eksponentti	n_{50} , 1/h
Helsinki	suojainen	tyypillinen	1	2	0,63-0,73-0,83	0,15-3,9-10
Jyväskylä	suojainen	tyypillinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Sodankylä	suojainen	tyypillinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojaton	tyypillinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	maaseutu	tyypillinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	ei tuulta	tyypillinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	YP-vetoinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	AP-vetoinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	YP/AP-vetoinen	1	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	tyypillinen	0,85	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	tyypillinen	1,15	2	0,73	0,15-3,9-10
Helsinki	suojainen	tyypillinen	1	1	0,73	0,15-3,9-10

Taulukko 3.2.2 Simulointitapausten lähtötietoina käytetyt pientalojen pystysuorat vuotojakaumat. Kuvassa 3.2.1 on esitetty numerointia (1-5) vastaava vuotokohtien sijainti.

Vuotokohtien sijainti (sijaintikohdan numero on mainittu suluissa)		Vuotojakauma, %				
		Tyypillinen	YP- vetoinen	AP- vetoinen	YP/AP- vetoinen	Tyypillinen (1 krs)
2. krs	US-YP-liitos (1)	36	75	12,5	50	-
	Ikkunakarmin yläreuna (2)	4	0	0	0	-
	Ikkunakarmin alareuna (3)	4	0	0	0	-
	US-VP-liitos (4)	2	0	0	0	-
1.krs	US-VP-liitos (4)	21	12,5	12,5	0	50
	Ikkunakarmin yläreuna (2)	0	0	0	0	15
	Ikkunakarmin alareuna (3)	24	0	0	0	15
	US-AP-liitos (5)	10	12,5	75	50	20

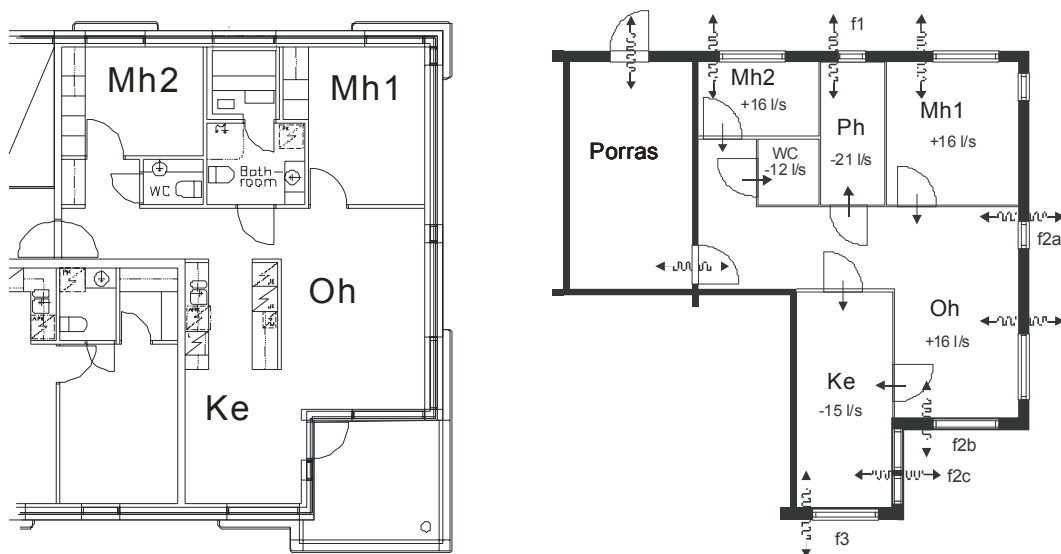
**Kuva 3.2.1** Vuotokohtien sijainti mallinuskohhteessa.

Kerrostalon vuotoilmanvaihtuvuutta tutkittiin lisäksi simuloimalla 5-kerroksisen kerrostalon mallia Helsingin ilmasto-oloissa käyttäen samoja testivuoden säätietoja kuin pientalon tapauksessa. Simulointi suoritettiin suojaisessa sekä lähes suojattomassa tuuliympäristössä käyttäen ilmavuotolukua $n_{50} = 1 \text{ l/h}$. Rakennuksessa on tasapainoinen koneellinen tulo- poistoilmanvaihtojärjestelmä. Kerrostalon IDA-ICE-mallissa on mukana porraskäytävä sekä yksi (3h+k) huoneisto 2. ja 5. kerroksista (kuva 3.2.2), jolloin porraskäytävän ja huoneistojen väliset ilmavirtaukset otetaan huomioon. Simuloinneissa oletettiin, että porraskäytävän alaoven ritilä on auki, porraskäytävän ja huoneistojen väliset postiluukut ovat lähes kiinni (3 mm rako) sekä porraskäytävän ja huoneiston välinen kevyt väliovi on auki. Simulointimallia on kuvattu tarkemmin lähteessä (Jokisalo et al. 2003).



Kuva 3.2.2 Periaatekuva kerrostalon simulointimallista. Mallinnetut vyöhykkeet on merkitty kuvassa paksulla ääriiviivalla ja virtausreitit nuolilla.

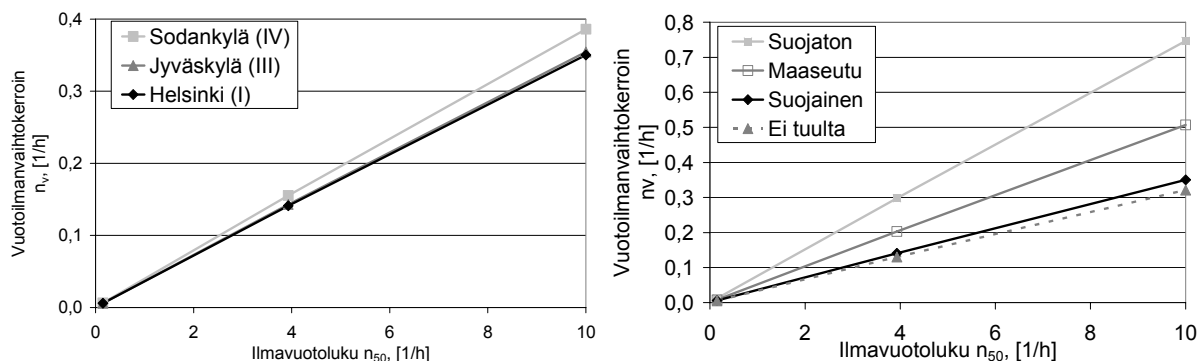
Mallinnettujen huoneistojen pohjapiirustus sekä mallin huoneistojen vyöhykejako on esillä kuvassa (3.2.3).



Kuva 3.2.3 Mallinnetun kerrostalohuoneen pohjapiirustus (vasen) sekä simulointimallin vyöhykejako. Ilmanvaihdon tuloilmavirrat on merkitty kuvaan (+) merkillä ja vastaavasti poistoilmavirrat (-) merkillä. Mallinnetut ilmavuotoreitit vyöhykkeiden välillä sekä vaipan yli on merkitty kuvaan nuolilla.

3.2.2 IDA-ICE-simulointitulokset

Kuvissa 3.2.4–3.2.6 on esitetty tarkasteluihin valittujen tekijöiden vaikutuksia vuotoilmanvaihtokerroimen ja ilmavuotoluvun väliseen suhteeseen. Kuvien perusteella pientalon keskimääräinen vuotuinen vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa lähes lineaarisesti ilmavuotoluvun n_{50} kasvaessa. Vuotoilmanvaihtokerroimessa on jonkin verran eroja riippuen ilmasto-oloista: Sodankylässä vuotoilmanvaihtokerroin on noin 10 % suurempi kuin Helsingissä, mutta Jyväskylässä se on vain 1 % suurempi verrattuna Helsinkiin (kuva 3.2.4). Vuotoilmanvaihtokerroin on lähes yhtä suuri Helsingissä ja Jyväskylässä, koska Jyväskylän kylmemmän ulkolämpötilan vaikutus lähes kompensoituu Helsinkiä heikommilla tuulioloilla. Tämän tuloksen perusteella Suomi voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: Ilmastovyöhykkeisiin (I-III), joissa tyypillisen pientalon vuotoilmanvaihtokerroin on lähes yhtä suuri tietyllä ilmavuotoluvun arvolla, ja ilmastovyöhykkeeseen (IV), jossa vuotoilmanvaihtokerroin on hieman suurempi kuin muissa vyöhykkeissä johtuen kylmemmästä ilmastosta. Kuvan 3.2.4 perusteella tuulen osuus on alle 10 % 2-kerroksisen pientalon vuotoilmanvaihtokerroimesta suojaisessa tuuliympäristössä Helsingissä. Vastaavasti tuulen osuus on noin 35 % maaseudun tuulioloissa tai hieman yli 50 % suojaattomassa tuuliympäristössä. Tulos osoittaa, että lämpötilaeroista johtuva (savupiippuvaikutus) vuotoilmanvaihto on yleensä tuulesta aiheutuvaa vuotoilmanvaihtoa merkittävämpi tekijä tyypillisessä 2-kerroksisessa pientalossa Suomessa.

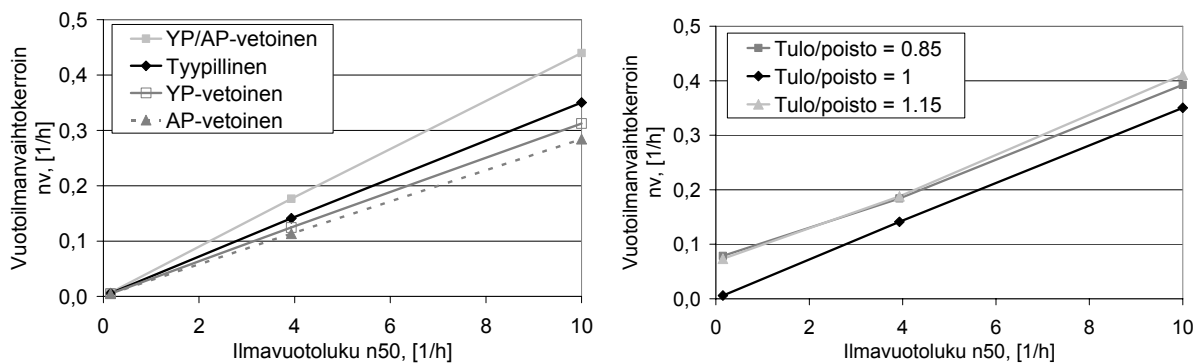


Kuva 3.2.4 Suomalaisen ilmasto-olojen (vasen) ja tuuliympäristön (oikea) vaikutus 2-kerroksisen pientalon vuotoilmanvaihtokerroimeen. Tuuliympäristön vaikutusta on tarkasteltu ilmastovyöhykkeellä I (Helsinki).

Kuvan 3.2.5 perusteella erilaisista vuotojakaumista aiheutuu jopa 50 %:n ero tutkitun pientalon vuotoilmanvaihtokerroimeen suojaisessa tuuliympäristössä. Suurimman vuotoilmanvaihtokerroimen aiheuttaa *YP/AP-vetoinen* vuotojakauma, jossa vuotoreittien välinen korkeusero on suurimmillaan. Tämä vuotojakauma aiheuttaa noin 25 % suuremman vuotoilmanvaihtokerroimen kuin *tyypillinen* vuotojakauma. *YP-vetoinen* tai *AP-vetoinen* vuotojakauma johtaa puolestaan 10–20 % pienempään vuotoilmanvaihtokerroimeen. Tulos osoittaa, että vuotojakaumalla on merkittävä vaikutus pientalon vuotoilmanvaihtokerroimeen ja se on syytä ottaa huomioon vuotoilmanvaihtoon liittyvissä simuloinneissa.

Koska mallinnetussa pientalossa ei ole erillisiä korvausilmaventtiileitä, joiden kautta ilmanvaihtojärjestelmän epätasapainosta johtuva korvausilma voisi virrata vaipan läpi, katsotaan myös korvausilman kuuluvan vuotoilmavirtoihin. Kun ilmanvaihtojärjestelmä on

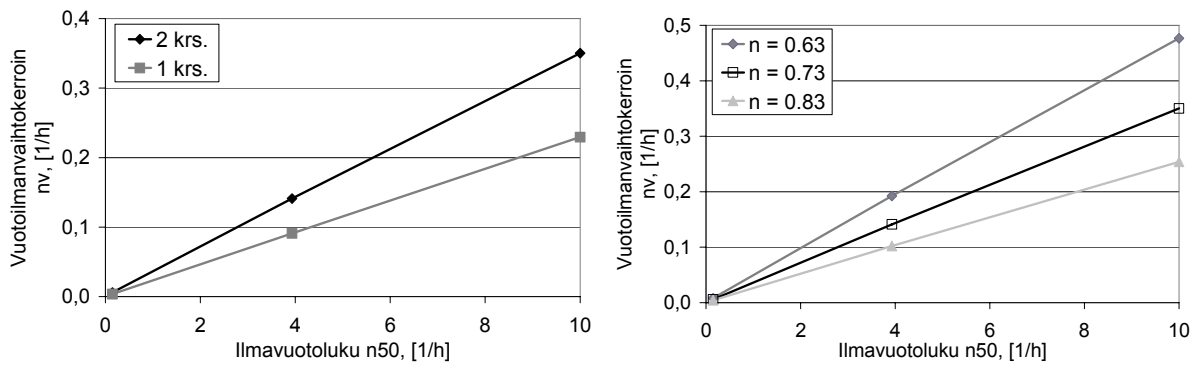
alipaineinen, on kuvassa 3.2.5 esitetty vuotoilmanvaihtokerroin laskettu vaipan läpi sisään virtaavan ilman perusteella ja vastaavasti ylipaineisen ilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa on laskennassa käytetty vaipan läpi ulospäin virtaavaa ilmaa. Tällä tavoin määritelty vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa ilmanvaihtojärjestelmän epätasapainosta johtuen. Mikäli korvausilmaa ei katsota kuuluvaksi vuotoilmavirtoihin, ilmanvaihtojärjestelmän epätasapaino hieman pienentäisi tuulesta ja lämpötilaeroista johtuvaa vuotoilmanvaihtokerrointa. Rakennuksen vaipan ollessa lähes täysin ilmatiivis, vuotoilmavirrat määräytyvät lähes kokonaan korvausilmavirtojen perusteella (kuva 3.2.5). 15 %:n epätasapaino tulo- ja poistoilmavirroissa kasvattaa 10–30 % vuotoilmanvaihtokerrointa rakennuksen ilmanpitävyyden ollessa normaali tai hatara.



Kuva 3.2.5 Vuotojakauman (vasen) ja ilmanvaihdon tasapainon (oikea) vaikutus 2-kerroksisen pientalon vuotoilmanvaihtokertoimeen ilmastovyöhykkeellä I (Helsinki).

Rakennuksen korkeudella on merkittävä vaikutus vuotoilmanvaihtokertoimen arvoon. Kun ilma rakennuksen sisällä pääsee virtaamaan vapaasti kerrosten välillä, on 2-kerroksisen pientalon vuotoilmanvaihtokerroin keskimäärin noin 60 % suurempi kuin 1-kerroksisen pientalon (kuva 3.2.6).

Vuotoyhtälön (kaava 2.2.1) eksponentilla on myös merkittävä vaikutus vuotoilmanvaihtokertoimen arvoon (kuva 3.2.6). Verrattuna keskimääräisellä vuotoyhtälön eksponentilla (0,73) laskettuun tulokseen, vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa noin 36 % eksponentin ollessa 0,63 tai vähenee noin 27 %, mikäli eksponentti on 0,83. Tulos osoittaa, että mikäli rakennuksen vaipassa on keskimäärin suurempia rakoja, on vuotoilmanvaihtokerroin merkittävästi suurempi kuin rakennuksessa, jonka vuotoreitit ovat keskimäärin pienempiä, vaikka painekoneen antama ilmavuotoluku on molemmille rakennuksille täsmälleen sama.



Kuva 3.2.6 Rakennuksen korkeuden (vasen) ja vuotoyhtälön eksponentin (vuotoraon koko) vaikutus pientalon vuotoilmanvaihtokertoimeen ilmastovyöhykkeellä I (Helsinki).

Mallinnettujen kahden kerrostalohuoneiston keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin on suojaisessa tuuliympäristössä 0,053 1/h ja lähes suojattomassa ympäristössä 0,075 1/h. Vuotoilmanvaihtokertoimeen vaikuttaa merkittävästi myös porraskäytävän ja huoneistojen välisten virtausreittien virtausvastus. Mikäli porraskäytävän ja huoneistojen väliset postiluukut ovat auki, kasvaa vuotoilmanvaihtokerroin selvästi. Esimerkiksi em. keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin lähes suojattomassa tuuliympäristössä olisi 0,11 1/h, eli vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa noin 50 %.

3.2.3 Yksinkertaistettu laskentamalli

Pientalon simulointitulosten perusteella ilmavuotoluvun ja vuotoilmanvaihtokertoimen välinen yhteys on lähes lineaarinen. Tällöin rakennuksen keskimääräistä vuotoilmanvaihtokertoiminta n_v voidaan arvioida jakamalla rakennuksen ilmavuotoluku n_{50} ns. ilmavuotokertoimella x oheisen kaavan mukaisesti.

$$n_v = \frac{n_{50}}{x} \quad (3.2.1)$$

Kun kuvassa 3.2.2 simuloitujen pientalon vuotoilmanvaihtokertoimet sijoitetaan kaavaan 3.2.1, saa ilmavuotokerroin x arvoja riippuen olosuhteista ja muista tekijöistä. Kaavan 3.2.1 mukaista laskentamallia voidaan soveltaa tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustettuun taloon vaipan ilmanpitävyydestä riippumatta, mutta epätasapainoisen ilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa menetelmä soveltuu ainoastaan ilmanpitävyydeltään normaaleihin tai sitä hatarampiin rakennuksiin. Mikäli rakennuksen ilmavuotoluku on selvästi alle 3,9 1/h ja ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirrat ovat epätasapainossa noin 15 % tai enemmän, rakennuksen vuotoilmanvaihtokerroin johtuu pääosin ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamista paine-eroista, eikä kaavan 3.2.1 mukaista yksinkertaista laskentamallia voida käyttää.

Kuvissa 3.2.4–3.2.6 esitettyjen pientalon simulointitulosten perusteella kaavan 3.2.1 ilmavuotokertoimelle x voidaan johtaa laskentakaava, joka koostuu vuotoilmanvaihtoon liittyvien tekijöiden korjauskertoimista. Tällöin kaava 3.2.1 esitetään seuraavassa muodossa:

$$n_v = \frac{n_{50}}{L \cdot W \cdot D \cdot H \cdot E \cdot B} \quad (3.2.2)$$

missä

L	ilmasto-oloista riippuva korjauskerroin [-]
W	tuulioloista riippuva korjauskerroin [-]
D	rakennuksen vuotojakaumasta riippuva korjauskerroin [-]
H	rakennuksen korkeudesta riippuva korjauskerroin [-]
E	vuotoyhtälön eksponentista riippuva korjauskerroin [-]
B	ilmanvaihdon tasapainosta riippuva korjauskerroin [-]

Taulukko 3.2.3 Korjauskertoimet suomalaisen pientalon keskimääräisen vuotoilmanvaihtokertoimen (kaava 3.2.2) laskentamalliin.

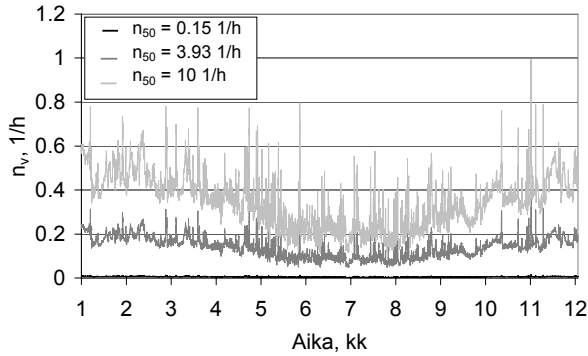
Korjauskerroin	Korjauskertoimen arvo			
Ilmastovyöhyke L	I-III 27	IV 25		
Tuuliolot W	suojaton 0,5	maaseutu 0,7	suojainen 1	
Vuotojakauma D	YP/AP-vetoinen 0,8	tyypillinen 1	YP-vetoinen 1,1	AP-vetoinen 1,2
Kerrosten lkm. H	1 1.6	2 1		
Vuotoyhtälön eksponentti E	suurempia rakoja 0,7	tyypillinen 1	pienempiä rakoja 1,4	
Ilmanvaihdon tasapaino B	tasapainoinen 1	yli- tai alipaineinen 0.8		

Kaavan 3.2.2 ja taulukon 3.2.3 perusteella tyypillisen ilmastovyöhykkeillä (I-III) suojaisissa tuulioloissa tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustetun 1-kerroksisen pientalon keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin voidaan laskea kaavalla $n_{50}/43$ ja 2-kerroksisen vastaavasti $n_{50}/27$. Sovellettaessa kaavan 3.2.2 laskentamallia taulukon 3.2.3 korjauskertoimilla neljäänkymmeneen taulukossa 3.2.1 esitettyyn tapaukseen, poikkeaa yksinkertaistetun laskentamallin tulokset $-7-18\%$ IDA-ICE-simulointituloksista ja keskimääräinen ero on 5% . Jos yksinkertaistettua laskentamallia sovelletaan tapauksiin, jotka eivät vastaa lähtötiedoiltaan taulukon 3.2.1 tapauksia, on yksinkertaistuksesta aiheutuva virhe luonnollisesti suurempi.

Taulukossa 3.2.3 esitetyt korjauskertoimet eivät sovellu kerrostalon vuotoilmanvaihtokertoimen laskentaan. Kaavan 3.2.1 mukaista yksinkertaista lähestymistapaa voidaan kuitenkin käyttää myös kerrostaloilla. Kahden kerrostalon simulointitapauksen perusteella kaava 3.2.1 saa suojaisessa tuuliympäristössä muodon $n_{50}/19$ tai lähes suojattomassa ympäristössä $n_{50}/13$.

3.2.4 Vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten

Mikäli keskimääräistä vuotuista vuotoilmanvaihtokerrointa käytetään rakennuksen lämmitysenergiankulutuksen laskennassa, tulee vuotoilmanvaihtokerrointa laskettaessa ottaa huomioon vuotoilmavirtojen riippuvuus sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta. Lämpötilaerosta johtuen vuotoilmanvaihtokerroimen arvo kasvaa lämmityskaudella (kuva 3.2.7).



Kuva 3.2.7 Vuotoilmanvaihtokerroimen hetkittäiset arvot laskentavuoden aikana Helsingissä tutkituilla ilmapuotoluvun arvoilla.

Vuotoilmavirtojen vaihtelut lämmitys- ja kesäkauden välillä voidaan ottaa huomioon esimerkiksi laskemalla sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksella painotettu vuotoilmanvaihtokerroimen vuosikeskiarvo n_v^e :

$$n_v^e = \frac{\sum_{i=1}^{8760} (T_a - T_e^i) n_v^i}{\sum_{i=1}^{8760} (T_a - T_e^i)} \quad (3.2.3)$$

missä

T_a huonelämpötilan asetusarvo [°C]

T_e^i tunnittainen ulkolämpötila [°C]

Kaavan 3.2.2 tyyppistä esitystapaa käytettäessä em. painotus lämmöntarpeella voidaan ottaa huomioon ilmapuotokertoimen korjauskertoimella k .

$$n_v^e = \frac{n_{50}}{kx} \quad (3.2.4)$$

Tutkittujen tapausten perusteella korjauskerroin k riippuu hieman tuulioloista, mutta riippuvuus ilmasto-oloista on merkityksetön. Suojaisissa tuulioloissa korjauskerroin 2-kerroksiselle pientalolle on 0,86, kun sen arvo suojattomissa tuulioloissa on 0,97. Tutkituissa tapauksissa korjauskerroin on keskimäärin 0,9.

Tällöin keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten voidaan laskea tyyppilliselle ilmastovyöhykkeillä (I-III) suojaisissa tuulioloissa tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustetulle 1-kerroksiselle pientalolle kaavalla $n_{50}/39$ ja 2-

kerroksiselle pientalolle kaavalla $n_{50}/24$. Vastaavasti kerrostalon vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten on tällöin $n_{50}/17$.

3.2.5 Laskentamenetelmien vertailu

Kuten luvussa 3.2.3 todettiin, yksinkertainen laskentamenetelmä, jossa keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin lasketaan jakamalla rakennuksen ilmavuotoluku n_{50} vakiokertoimella, ei sovellu rakennuksille, joissa koneellisen ilmanvaihdon ilmavirrat vaikuttavat merkittävästi vuotoilmanvaihtuvuuteen. Tällaisissa tapauksissa ilmanvaihdon ilmavirrat tulee ottaa laskentamenetelmässä huomioon. Menetelmiä, joissa ilmavirrat otetaan huomioon, ovat esimerkiksi standardiin EN ISO 13789 (2008) pohjautuva laskentamenetelmä, jossa vuotoilmanvaihtokerroin lasketaan kaavalla 3.2.5 tai dynaaminen IDA-ICE-simulointiohjelma.

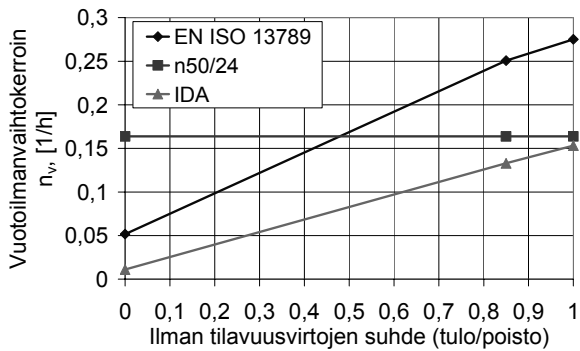
$$n_v = \frac{0,07 \cdot n_{50}}{1 + 2,78 \cdot 10^9 \left(\frac{\dot{V}_p - \dot{V}_t}{V \cdot n_{50}} \right)^2} \quad (3.2.5)$$

missä

\dot{V}_p	ilmanvaihdon poistoilmavirta [m^3/s]
\dot{V}_t	ilmanvaihdon tuloilmavirta [m^3/s]
V	rakennuksen tilavuus [m^3]

Kaava 3.2.5 kuvaa taajaman tuulioloissa olevan rakennuksen vuotoilmanvaihtokerrointa n_v .

Kuvassa 3.2.8 on verrattu ilmastovyöhykkeillä (I-III) taajaman tuulioloissa olevan kaksikerroksisen pientalon ($n_{50} = 3,9 \text{ l/h}$) vuotoilmanvaihtokerrointa (energiälaskentaa varten) laskettuna kohdassa 3.2.4 esitetyllä laskentamenetelmällä $n_{50}/24$, kaavalla 3.2.5 tai IDA-ICE-simulointiohjelmalla. Verratuissa tapauksissa ilmanvaihdon ilmavirtojen (tulo/poisto) suhde sai arvot (0, 0,85 ja 1) kuvaten koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää, sekä hieman alipaineista ja täysin tasapainoista koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää. Koska standardin EN ISO 13790 (2008) menetelmässä ilmanvaihdon korvausilmavirtojen ei oleteta kuuluvan vuotoilmavirtoihin, vertailussa on käytetty samaa oletusta myös IDA-ICE-ohjelmalla tehdyssä simuloinnissa. Luvussa 3.2.4 esitetty lämpötilakorjaus on otettu huomioon IDA-ICE-ohjelmalla saadussa tuloksessa sekä luonnollisesti myös kaavassa $n_{50}/24$. Vertailtavan tapauksen perusteella yksinkertainen laskentamenetelmä ($n_{50}/24$) antaa melko hyvän arvion vuotoilmanvaihtokertoimesta IDA-ICE-ohjelmalla saatuihin tuloksiin verrattuna ilmanvaihdon ollessa hieman alipaineinen (15 % pienempi tuloilmavirta) tai täysin tasapainoissa. Mikäli tuloilmavirran suhde poistoilmavirtaan on alle 0,5, antaa EN ISO 13789 (2008) -standardin mukainen menetelmä selvästi paremman tuloksen IDA-ICE-tulokseen verrattuna kuin laskentakaava $n_{50}/24$. Vertailun perusteella EN ISO 13789 (2008) -standardin mukainen laskentatapa soveltuu paremmin koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetun rakennuksen vuotoilmanvaihtokertoimen laskentaan kuin yksinkertaistettu luvussa 3.2.3 esitetty menetelmä.



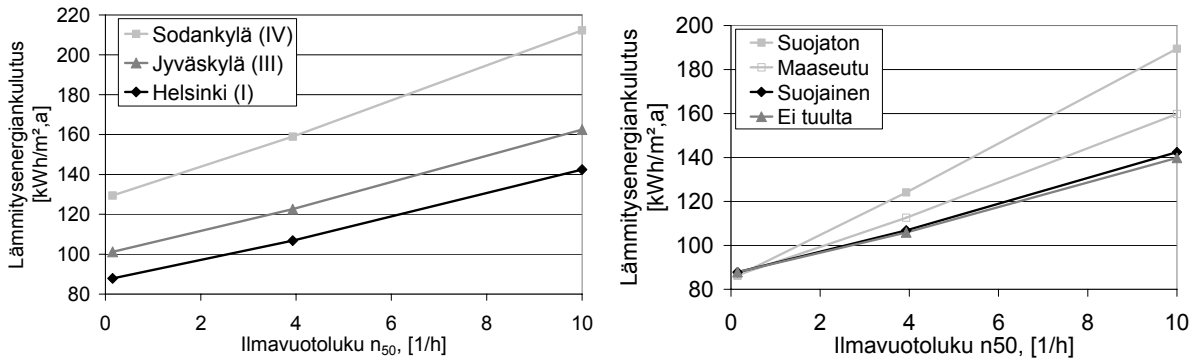
Kuva 3.2.8 Ilmanvaihdon tasapainon vaikutus pientalon vuotoilmanvaihtokertoimeen kolmen eri laskentamenetelmän perusteella.

3.3 Energiankulutus

Vuotoilmanvaihdon vaikutusta pientalon energiankulutukseen tutkittiin kohdassa 3.1 esitellyn dynaamisen IDA-ICE-simulointimallin avulla 2-kerroksisen pientalon simulointitapauksissa (ks. taulukko 3.2.1). Mallissa yhdistyy sekä ilmavirtojen että lämpöolojen laskenta siten, että esimerkiksi talotekniset järjestelmät, sisäisen lämpökuormat sekä auringon säteily otetaan tarkasti huomioon. Vuotoilman aiheuttamien lämpöhäviöiden laskenta ja rakennuksen vaipan johtumishäviöiden laskenta simuloidaan IDA-ICE-ohjelmassa, kuten muissakin kaupallisissa rakennusten termisissä simulointiohjelmissa erikseen, jolloin vuotoilmavirtojen ja johtumisen välistä kytkentää ei oteta huomioon. Kytkennän seurauksena osa vaipan lämmönjohtumisen häviöistä mm. palautuu sisäänvirtaavan vuotoilman mukana takaisin rakennukseen (Virtanen 1993). Kun tämä vaipassa tapahtuva lämmöntalteenottoefekti otetaan laskennassa huomioon, pienenee rakennuksen laskennallinen energiankulutus hieman. Tässä luvussa esitetyissä simulointituloksissa kyseinen kytkentä on otettu huomioon jälkikäsittelemällä IDA-ICE-mallin tulokset (Buchanan & Sherman 2000) esittämällä mallilla. Kytkennästä ja sen vaikutuksista tutkittuihin simulointitapauksiin on kerrottu enemmän julkaisussa (Jokisalo et al. 2007a). Kytkennän vaikutuksesta rakennuksen vuotuinen lämmitysenergiankulutus pienenee 1–5 kWh/m² riippuen mm. rakennuksen ilmanpitävyydestä. Tällöin kytkennän seurauksena rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus pienenee 1–4 %, eli kytkennällä on melko pieni vaikutus tutkitun pientalon kulutukseen.

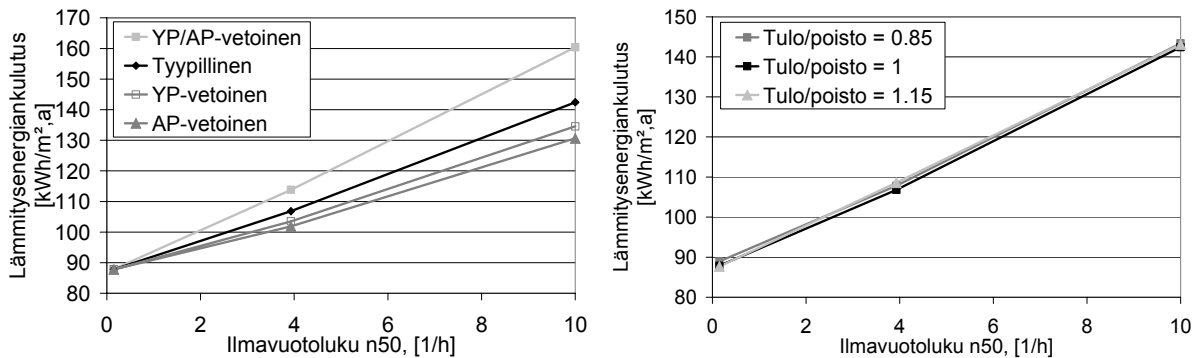
Taulukossa 3.2.1 esitettyjen tutkittujen 2-kerroksisten pientalojen simuloitu vuotuinen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus vaihtelee välillä 86–212 kWh/m²,a riippuen suurimmaksi osaksi ilmasto- ja tuulioloista. Simuloitu vuotuinen rakennusten kokonaiskulutus, joka sisältää lämpimän käyttöveden arvioidun lämmöntarpeen (25 kWh/m²,a) sekä kotitaloussähkökulutuksen (41,5 kWh/m²,a), vaihtelee em. tapauksissa välillä 153–279 kWh/m²,a. Tulosten perusteella talojen lämmitysenergiankulutus on suoraan verrannollinen talojen vuotoilmanvaihtokertoimen arvoon, mutta kulutuserot Suomessa ilmastovyöhykkeiden välillä johtuvat pääosin erisuurista vaipan johtumishäviöistä sekä erisuuresta ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmityksen tarpeesta (kuva 3.3.1). Simuloitu pientalon lämmitysenergiankulutus on Jyväskylässä 13 kWh/m²,a ja Sodankylässä 42 kWh/m²,a suurempi kuin Helsingissä johtuen em. tekijöistä. Tuulioloilla on merkittävä

vaikutus pientalon energiankulutukseen: pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus on yli 30 % suurempi *suojattomassa* tuuliympäristössä verrattuna *suojaiseen* tuuliympäristöön (kuva 3.3.1).



Kuva 3.3.1 Suomalaisen ilmasto-olojen (vasen) ja tuuliympäristön (oikea) vaikutus 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutukseen.

Tyypilliseen (ks. taulukko 3.2.2) vuotojakaumaan verrattuna *YP/AP-vetoisen* pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus on jopa 13 % suurempi tai vastaavasti *AP-vetoisen* pientalon 8 % pienempi (kuva 3.3.2). Ilmanvaihdon tasapainolla on vähäinen vaikutus (max 2 %) tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutukseen (ks. kuva 3.2.2). Jos vuotoilmavirtojen ja lämmönjohtumisen kytkentää ei otettaisi huomioon, lisäksi ilmanvaihdon epätasapaino lähes täysin ilmanpitävän talon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutusta noin 5 %.



Kuva 3.3.2 Vuotojakauman (vasen) ja ilmanvaihdon tasapainon (oikea) vaikutus 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutukseen.

Simuloitujen tapausten perusteella vuotoilmavaihto aiheuttaa noin 15–30 % ilmanpitävyydeltään tyypillisen ($n_{50} = 3,9$ 1/h) 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksesta, kun vastaava osuus hataralle pientalolle ($n_{50} = 10$ 1/h) on 30–50 %. Koska rakennuksen vuotoilmavaihtokerroin kasvaa lähes lineaarisesti ilmavuotoluvun n_{50} kasvaessa, kasvaa myös rakennuksen lämmitysenergiankulutus samalla lähes lineaarisesti. Simuloiduissa tapauksissa tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus kasvoi 4–12 % ja vastaavasti rakennuksen kokonaiskulutus 2–7 % ilmavuotoluvun n_{50} yhden yksikön lisäystä kohti riippuen mm. tuulioloista. Tämän seurauksena rakennuksen energiankulutukselle voidaan johtaa ilmavuotoluvusta riippuva yksinkertainen nyrkkisääntö: keskimäärin

tutkituissa tapauksissa yhden yksikön lisäys ilmavuotoluvussa merkitsee noin 7 % lisäystä tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksessa ja noin 4 % lisäystä kokonaisenergiankulutuksessa.

3.4 Tulosten tarkastelu

Simulointimallin kokeellisen validointitapauksen perusteella IDA-ICE-simulointimalli ennustaa todenmukaisesti pientalon painesuhteita ja lämpöoloja, joten mallia voidaan käyttää vuotoilmanvaihdon ja energiankulutuksen tutkimiseen.

Simulointitutkimuksen perusteella rakennuksen vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa lähes lineaarisesti ilmavuotoluvun n_{50} kasvaessa. Tulosten perusteella Suomi voidaan karkeasti jakaa kahteen osaan, kun tarkastellaan pientalon vuotoilmanvaihtokerroimen riippuvuutta ilmavuotoluvusta: ilmastovyöhykkeistä (I-III) muodostuvaan alueeseen sekä ilmastovyöhykkeeseen (IV), jossa vuotoilmanvaihtokerroin on hieman suurempi kuin muilla vyöhykkeillä vaipan ilmavuotoluvun ollessa sama Suomessa lämpötilaeroista aiheutuva vuotoilmanvaihtokerroin (savupiippuvaikutus) on tyypillisesti suurempi pientaloissa ilmastovyöhykkeistä riippumatta kuin tuulen aiheuttama vuotoilmanvaihtokerroin.

Simulointituloksista johdettua yksinkertaistettua vuotoilmavaihtokerroimen laskentamallia voidaan käyttää pientalojen keskimääräisen vuotoilmanvaihtokerroimen karkeaan arviointiin Suomessa. Vuotoilmanvaihtokerroimen korjaus energialaskentaa varten voidaan tehdä jakamalla keskimääräinen vuotoilmanvaihtokerroin korjauskertoimella 0,9. Tällöin vuotoilmanvaihtokerroimen laskentakaava energialaskentaa varten tyypilliselle ilmastovyöhykkeillä (I-III) suojaisissa tuulioloissa olevalle ja tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustetulle 1-kerroksiselle pientalolle on $n_{50}/39$ ja 2-kerroksiselle pientalolle $n_{50}/24$. Vastaavasti kerrostalon vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten on $n_{50}/17$. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa merkittävästi vuotoilmavirtoihin, kuten esimerkiksi koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa, tulee vuotoilmanvaihtokerroin laskea muilla menetelmillä esim. EN ISO 13789 (2008) -standardin avulla tai IDA-ICE-simulointiohjelmalla, jotka ottavat huomioon ilmavirtojen vaikutuksen.

Vuotoilmanvaihto aiheuttaa 15–30 % tyypillisen ($n_{50} = 3,9$ 1/h) 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutuksesta. Keskimäärin 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus kasvaa 7 % ja kokonaiskulutus 4 %, kun ilmavuotoluku kasvaa yhden yksikön verran.

4 Läpivientien ilmanpitävyyskokeet

AISE-tutkimushankkeeseen liittyen testattiin putkiläpivientien ilmanpitävyyttä erilaisilla tiivistystavoilla. Kokeissa vertailtiin teipillä tai läpivientilaipalla tiivistettyjen koekappaleiden ilmanpitävyyttä polyuretaanivaahdolla tiivistettyjen läpivientien ilmanpitävyyteen. Kokeilla ei testattu eri tiivistystapojen ilmanpitävyyden pitkäaikaiskestävyyttä. Koesarja tehtiin TTY:n laboratoriossa rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla. Laitteistolla voidaan säätää muun muassa lämpötilaa ja paine-eroa pystyrakenteen eri puolilla ja mitata ilmavuoto, \dot{V} [l/min], rakenteen läpi.

4.1 Koejärjestely

Kokeilla mallinnettiin puurankarakenteeseen tehtäviä läpivientejä, joten koeseinä eristettiin mineraalivillalla ja testattavan rakenteen lämpimälle puolelle asennettiin ilmansulkukalvo. Ilmansulkuna käytettiin höyrynsulkumuovia tai paperipohjaista ilmansulkukalvoa. Kalvot kiinnitettiin koekappaleen reunoille puurimalla ja ruuvikiinnityksellä (k300). Tämän jälkeen puuriman ja kehikon reunan välinen rako tiivistettiin teippaamalla. Koekappaleen runko oli rakennesahataravasta ja vanerista valmistettu kehikko (kuva 4.1.1), jonka ulkomitat olivat 1200 x 1200 mm². Tuulensuojakerros jätettiin koerakenteesta pois, jotta mittaustuloksena saataisiin mahdollisimman tarkasti juuri läpiviennin ilmavuoto.

Kokeita tehtiin yhteensä 20 kappaletta. Kahdessa ensimmäisessä kokeessa testattiin ilmansulkukalvojen ilmanpitävyyden väliset erot. Muissa 18 koekappaleessa mitattiin erilaisten läpivientitapojen ilmatiiviyttä. Lämpötilaero rakenteen yli oli kokeiden aikana 6 °C (sisälämpötila 23 °C, ulkolämpötila 17 °C) ja sisäpuolella oli 50 Pa ylipaine.



Kuva 4.1.1 Koekappaleen kehikko mallinsi puurankarakennetta (vasemmalla). Asennus rakennusfysikaaliseen tutkimuslaitteistoon toteutettiin puristamalla koekappale aukon tiivisteitä vasten sekä tiivistämällä koekappaleen reunat teipillä (oikealla).

Kokeissa käytettiin kolmenlaisia läpivientiputkia. Yksittäisten putkien kokeessa läpivientinä oli ϕ 160 mm kierresaumattu IV-putki. Kolmen putken kokeissa tämän viereen lisättiin ϕ 110 mm muovinen tuuletusviemäriputki sekä ϕ 20 mm sähköputki (kuva 4.1.2). Putket

vaahdotettiin sisäpuolelta polyuretaanivaahdolla tai kitattiin. Näin kokeessa testattiin vain tiivistyskohdan ilmanpitävyyttä.



Kuva 4.1.2 Yksittäisten putkien läpiviennissä putkena oli $\varnothing 160$ mm kierresaumattu IV-putki (vasemmalla). Kolmen putken läpiviennissä tämän viereen lisättiin $\varnothing 110$ mm tuuletusviemäriputki sekä $\varnothing 20$ mm sähköputki (oikealla). Läpivientiputket vaahdotettiin sisältä polyuretaanivaahdolla tai kitattiin tiiviiksi. Kuvat ovat koekappaleista 11 ja 12.

Jokainen koekappale kalibroitiin erikseen rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa. Kalibrointi toteutettiin teippaamalla koekappaleen ulkopintaan höyrynsulkumuovikalvo. Tämän jälkeen koekappale asennettiin laitteistoon ja mitattiin koejärjestelyn alkuperäinen ilmavuoto eli kalibrointi-arvo. Ulkopuolen höyrynsulkumuovi leikattiin läpiviennin kohdalta auki, kun varsinaisen kokeen mittaus aloitettiin, (kuva 4.1.3).



Kuva 4.1.3 Kalibrointia varten koekappaleen taustapintaan tiivistettiin ehjä höyrynsulkumuovikalvo (vasemmalla). Koekappale asennettiin kalibrointia varten rakennusfysikaaliseen laitteistoon ja mitattiin koejärjestelyn alkuperäinen ilmavuoto eli kalibrointi-arvo (keskellä). Kokeessa kalibrointikalvo leikattiin auki läpiviennin kohdalta (oikealla).

Kalibrointi-arvoissa esiintyi kokeiden välillä merkittäviä eroja. Vaihtelu johtui todennäköisesti kalibroinnissa käytetyn höyrynsulkumuovin erilaisesta kiinnityksestä koe-elementtiin sekä koekappaleen erilaisesta asennuksesta ja tiivistyksestä laitteiston tutkimusaukkoon. Koekappale painettiin käsin tutkimusaukon tiivisteitä vasten ja kiristettiin paikalleen. Kaikki koekappaleet tiivistettiin samalle syvyydelle koekehikon aukkoon, mutta tiivisteiden painuminen kehikkoa vasten on silti saattanut olla epätasaista. Tämä on voinut aiheuttaa

mittausvirhettä myös lopullisiin koetuloksiin. Tulosten esityksessä kaikki kalibrointi-arvot on muunnettu vastaamaan nollassa, jotta tulokset ovat helpommin keskenään vertailtavissa.

Jokainen koekappale tasaantui kalibrointi-arvoonsa ja koetulosarvoonsa vähintään 10 tuntia. Yleensä tasaantumisaika oli huomattavasti tätä pidempi, mutta tuloksina on käytetty kymmenen tunnin keskiarvoja. Mittaustulokset kirjattiin kokeen aikana tietokoneelle minuutin välein. Tulosten käsittelyssä käytettiin 15 min välein kirjattuja arvoja.

4.2 Teipatut läpiviennit sekä läpivientilaipat

Koerakenteissa käytettiin kahta erilaista ilmansulkua, tavallista höyrinsulkumuovia tai paperipohjaista ilmansulkua. Vain ne tiivistysratkaisut, joissa tartuntapintojen erilaisuudella arvioitiin olevan vaikutusta kokeen lopputulokseen, testattiin molemmilla kalvovaihtoehdoilla. Ensimmäiseksi kokeissa 1 ja 2 määritettiin ehjien ilmansulkukalvojen ilmanpitävyys (kuva 4.2.1). Tulokset osoittivat, ettei ehjien ilmansulkujen ilmanpitävyydessä ole merkittäviä eroja. Ensimmäisten kokeiden perusteella tarkasteltiin myös koejärjestelyn virherajoja. Koska molemmissa kokeissa ilmavuoto oli ehjällä ilmansululla noin 0,15 l/min, voidaan arvioida, että koekappaleesta aiheutuva virhe oli tätä luokkaa.



Kuva 4.2.1 Kokeissa 1 ja 2 määritettiin ehjän höyrinsulkumuovin ja paperipohjaisen ilmansulun ilmanpitävyys.

Ensimmäisinä läpivienteinä (kokeet 3 ja 4) oli tarkoitus testata työmaalla teipattavien läpivientien ilmanpitävyyttä. Koetilanteessa haluttiin käyttää mahdollisimman yleisiä teippejä, jottei teipin materiaaliominaisuuksilla olisi merkittävää vaikutusta tulokseen. Sekä läpiviennit että koekappaleiden kalibrointimuovit teipattiin ilmastointiteipillä. Teippien ilmanpitävyys oli kokeissa riittävä, mutta niiden pitkäaikaiskestävyys ei täyttäisi todellisessa rakenteessa vaadittavia kriteerejä.

Kokeita tehtäessä todettiin, ettei kokeiden toteutus täysin työmaaolosuhteita vastaavasti ollut mahdollista. Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla ei saatu toteutettua 50 Pa paine-eroa tutkittavan rakenteen eri puolille, mikäli ilmansulussa oli silmin havaittava reikä. Toisin sanoen kaikki koekappaleet, joilla yleensä saatiin kokeissa tulos 50 Pa paine-erolla, voidaan todeta hyvin tiiviiksi ratkaisuiksi. Teippaustiivistyksiä jouduttiin parantelemaan useaan

otteeseen, eikä koeolosuhteissa saavutetun lopputuloksen toteutus työmaalla ole olosuhteista ja aikatauluista johtuen mahdollista.

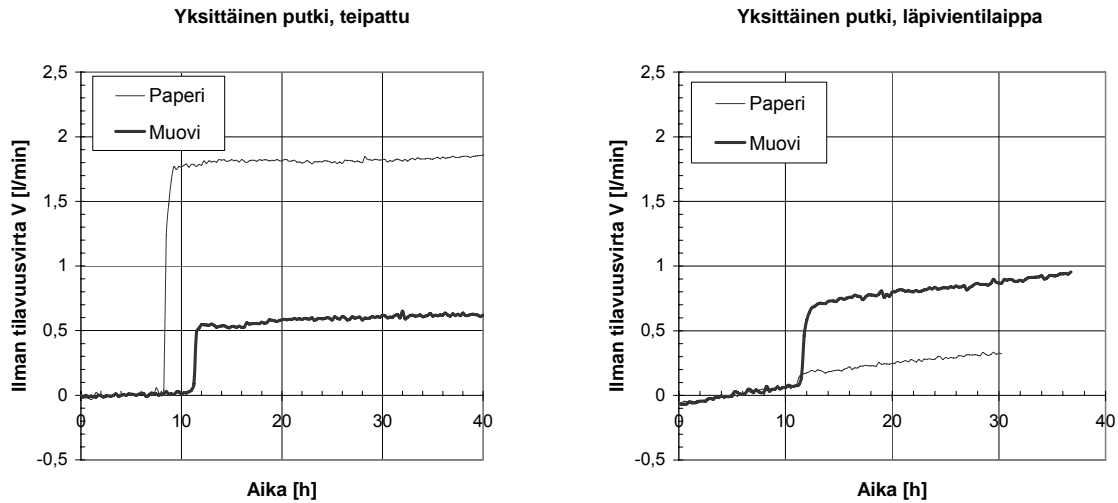
Lopulta yksittäisten putkien teippaustiivistyksistä saatiin hyväksyttävät tulokset, joiden perusteella muovikalvoon tiivistetty läpivienti oli jonkin verran paperipohjaisen ilmansulun läpivientä tiiviimpi. Erot tuloksissa johtuivat todennäköisesti työn suorituksen erilaisesta onnistumisesta. Teippaustyön suoritus paperipohjaiseen ilmansulkuun oli jonkin verran hankalampaa, koska kalvo oli jäykempää eikä se taittunut IV-putken ympärille yhtä tasaisesti kuin höyrynsulkumuovi, (kuva 4.2.2).

Toisaalta teippien tartunta paperipohjaiseen ilmansulkuun oli jossain määrin parempi kuin muoviin. Tämä havaittiin erityisesti kokeissa 6 ja 7, joissa käytettiin läpivientilaippoja putkien ympärillä. Ensimmäiseksi tehdyissä kokeissa läpivientilaipan liimakiinnitys irtosi lähes täysin molemmista ilmansulkukalvoista 50 Pa paineessa. Tämän jälkeen kokeet uusittiin teippaamalla laipan reunat ilmansulkukalvoon kiinni ja saatiin tulokset, joiden mukaan läpivientilaipoilla toteutettu tiivistys oli jonkin verran teipattua tiivistystä parempi, (kuva 4.2.3).



Kuva 4.2.2 Läpivientejä varten ilmansulkuun tehtiin koekappaleita kootessa X-viilto (vasemmalla). Ensimmäisessä koesarjassa yksittäiset putket tiivistettiin teippaamalla (keskellä). Yksittäisten läpivientien tiivistykseen kokeiltiin myös läpivientilaippoja (oikealla).

Läpivientilaipan dimensiot rajoittivat ilmansulkuun tehtävän X-viillon kokoa. Kokeessa käytetty putkikoko, $\phi 160$ mm, oli suurin mahdollinen kyseiseen laippaan sopivista putkista. Työteknisesti läpivientilaipoilla toteutettu tiivistys onnistui helpommin kuin teippaamalla toteutettu. Läpivientilaipat eivät kuitenkaan sovellu kohteisiin, joissa rakenteen läpäisee useampi putki vierekkäin.



Kuva 4.2.3 Teippaamalla tiivistetyissä läpivienneissä höyrynsulkumuoviin tiivistetty läpivienti oli kokeessa ilmanpitävämpi kuin paperipohjaiseen ilmansulkuun tehty (vasemmalla). Läpivientilaipoilla tiivistys onnistui helpommin kuin teippaamalla. Laipan tartunta oli hieman parempi paperipohjaiseen ilmansulkukalvoon (oikealla).

Kokeessa 5 tiivistettiin kolmen putken läpivienti teippaamalla höyrynsulkumuoviin. Kaksi suurinta putkea olivat kiinni toisissaan ja pienin putki hieman niiden alapuolella. Putkien välin teippaaminen ei onnistunut ilmastointiteipillä, joten tiivistystä yritettiin toteuttaa alumiiniteipillä. Tiivistystä paranneltiin ja uusittiin useasti, mutta kokeesta ei saatu hyväksyttävää tulosta. Putkien väliin jäi aina sen verran tiivistämätöntä aluetta, ettei rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla saatu aikaan 50 Pa paine-eroa rakenteen yli, (kuva 4.2.4). Koe toteutettiin myös pienemmällä paine-erolla (10 Pa) ja tästä kokeesta saadun tuloksen perusteella koekappaleen 5 ilmapuoto arvioitiin monikymmenkertaiseksi muihin testattuihin koekappaleisiin nähden.



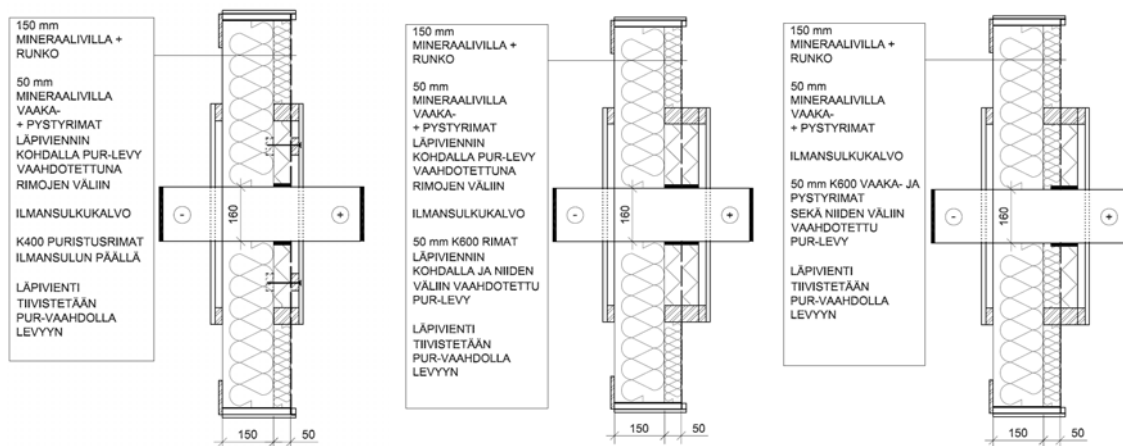
Kuva 4.2.4 Putkien väliä yritettiin tiivistää alumiiniteipillä (vasemmalla). Teippauksia paranneltiin useasti, mutta kolmen putken läpivientikokeesta ei teippaamalla saatu hyväksyttävää tulosta (oikealla).

Kokeista 3–7 voidaan todeta, että teippaamalla toteutetut tiivistykset voidaan saada yksittäisten putkien tapauksessa hyvinkin tiiviiksi huolellisella työnsuorituksella. Läpivientilaipoilla yksittäisten läpivientien tiivistyksen toteutus on työtekniisesti helpompaa kuin teippaamalla. Useamman putken läpivienneissä teippitiivistyksen saaminen ilmanpitäväksi oli käytännössä mahdotonta.

4.3 PUR-vaahdolla tiivistetyt läpiviennit

Kokeissa 8–16 läpiviennin tiivistys perustui jäykästä polyuretaanilevystä (PUR) tehtyjen kaulusten käyttöön. Levy vaahdotettiin rakenteeseen koolausrimojen väliin. Ratkaisujen toimintaperiaate oli, että läpivientiputket voidaan PUR-vaahdolla tiivistää suoraan 50 mm paksuun tiivistyslevyyn. Vaahdon annettiin kaikissa kokeissa kovettua vähintään vuorokausi ennen kokeen aloittamista.

Kokeissa testattiin erilaisia vaihtoehtoja, joilla PUR-kaulus saatiin ilmanpitävästi liitettyä rakenteen muuhun ilmansulkuun. Kokeissa 8–10 PUR-levy oli rakenteessa ilmansulun takana, kokeissa 11 ja 12 käytettiin kahta PUR-levyä (ilmansulun molemmin puolin) ja kokeissa 13–16 PUR-levy oli ilmansulun etupuolella (kuva 4.3.1). Kaksi ensin mainittua koetyyppiä soveltuvat rakennuskohteisiin, joissa tulevat läpivientien paikat tiedetään melko tarkasti jo rakennusvaiheessa. Viimeksi mainittu ratkaisu sopii myös valmiisiin rakenteisiin tehtäviin läpivientitiivistyksiin.



Kuva 4.3.1 PUR-kauluksella toteutetuissa kokeissa oli kolme erilaista variaatiota: tiivistyslevy ilmansulkukalvon takana (vasemmalla), kaksi tiivistyslevyä ilmansulun molemmin puolin (keskellä) ja tiivistyslevy ilmansulun etupuolella (oikealla).

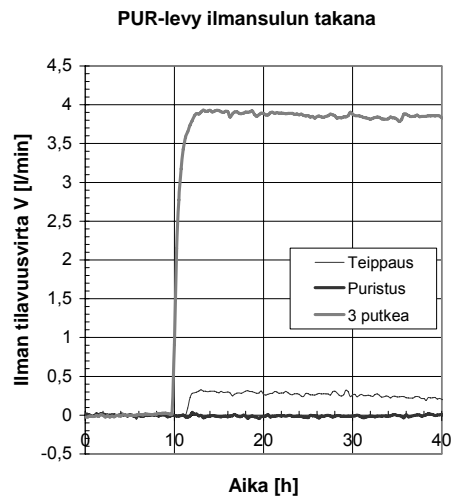
Ensimmäisissä PUR-tiivistyslevyllä toteutetussa kokeessa levy oli ilmansulun takana ja ilmansulkukalvoon läpivientä varten tehty aukko tiivistettiin reunoiltaan PUR-levyyn. Ensimmäisessä kokeessa ilmansulun tiivistys levyyn toteutettiin puristamalla puurimoilla (kuva 4.3.2) ja toisessa teippaamalla (kuva 4.3.3).

Puristustiivistystä varten rakenteeseen jouduttiin lisäämään vastarimat PUR-levyn taustapuolelle. Tämä aiheutti ylimääräisen työvaiheen koekappaleen kokoamisessa. Samoin käytettäessä tiivistystapaa todellisessa rakenteessa, puristusrimat tulee kiinnittää paikalleen eristeitä asennettaessa. Puristusrimojen tulee olla suoraan tiivistyslevyn takana, joten rimat joudutaan kiinnittämään eristekerrosten väliin. Puristus toteutettiin 25 mm x 50 mm rimalla ja k300 ruuvikiinnityksellä.



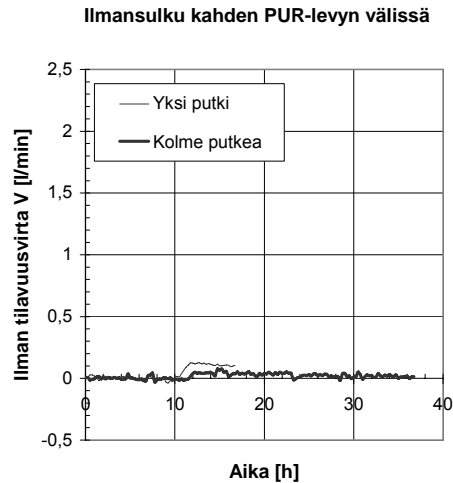
Kuva 4.3.2 Puristusliitosta varten rakenteeseen lisättiin kulmarauodoilla vastarimat PUR-levyn taustapuolelle (vasemmalla). Ilmansulkukalvo puristettiin PUR-levyyn rimoilla ja k300 ruuvi kiinnityksellä (oikealla).

Seuraavassa kokeessa ilmansulkukalvo tiivistettiin PUR-levyyn alumiiniteipillä. Lisäksi tässä koekappaleessa polyuretaanilevyssä oli uritus, joka täytettiin tiivistyksen kohdalla liimamassalla. Koe toteutettiin sekä yhdellä että kolmella putkella. Kolmen putken läpiviennissä tulos oli kaikista mitatuista koekappaleista selvästi heikoin, mikä saattaa johtua putkien välisen tilan vaahdotuksen epäonnistumisesta (kuva 4.3.3).



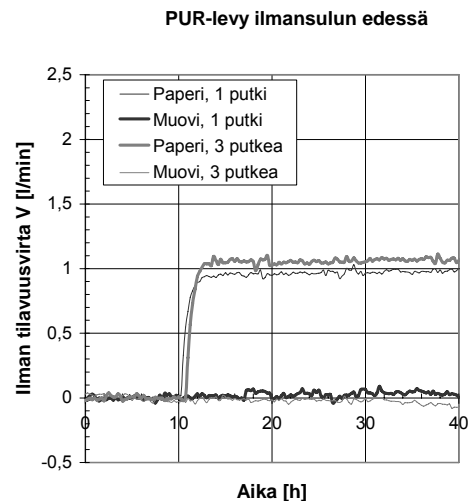
Kuva 4.3.3 Läpivientä varten ilmansulkuun tehty aukko teipattiin alumiiniteipillä PUR-levyyn. Läpivientiputket tiivistettiin levyyn vaahdolla (vasemmalla). Yksittäisten putkien tiivistykset olivat hyvin onnistuneet, mutta kolmen putken läpiviennissä tulos oli heikompi (oikealla).

Toisessa PUR-kauluksilla toteutetussa koesarjassa ilmansulkukalvo jäi kahden tiivistyslevyn väliin (kuva 4.3.1). Läpivientä varten rakenteeseen tehtiin reikä suoraan tiivistyslevyjen ja ilmansulun läpi. Putkia tiivistettäessä myös levyjen väli tiivistyi polyuretaanivaahdolla, joten vaahdotusta tehtäessä on tärkeää, että vahto ulottuu sisempään levyyn saakka. Koe tehtiin sekä yksittäiselle että kolmen putken läpiviennille ja molemmissa tapauksissa ratkaisu oli hyvin tiivis (kuva 4.3.4).



Kuva 4.3.4 Kahdella tiivistyslevyllä toteutetuissa kokeissa testattiin sekä yksittäinen läpivienti että kolmen putken yhdistelmä (vasemmalla). Molemmissa kokeissa tulokset olivat hyviä (oikealla).

Kolmas testattu PUR-kaulus soveltuu myös kohteisiin, joissa läpivienti tehdään olemassa olevaan rakenteeseen. PUR-levy kiinnitettiin vaahdottamalla ilmansulun eteen kiinnitettyihin rimoihin. Todellisessa rakennuskohteessa nämä voisivat olla esimerkiksi kattorakenteen alaslaskurimoja. Läpivientiä varten koko rakenteen läpi tehtiin reikä ja putket tiivistettiin PUR-vaahdolla levyyn. Vahto tiivisti myös ilmansulun reunat levyyn, joten se ulottui myös tiivistyslevyn taakse. Kokeet toteutettiin molemmilla ilmansulkukalvoilla sekä yhden että kolmen putken läpiviennillä. Yhden putken läpiviennit olivat kummassakin tapauksessa hyvin tiiviitä ja kolmen putken läpivientien ilmanpitävyys oli jonkin verran heikompi (kuva 4.3.5). Sähköputki oli kolmen putken kokeissa hieman muista putkista erillään, joten se oli käytännössä yksittäinen läpivienti.



Kuva 4.3.5 Viimeisissä PUR-kauluksella toteutetuissa kokeissa tiivistyslevy asennettiin vain ilmansulun etupuolelle (vasemmalla). Kolmen putken läpivientien ilmanpitävyys oli heikompi kuin yksittäisten putkien (oikealla).

PUR-kauluksilla toteutetut läpiviennit olivat kaikki huomattavasti tiiviimpiä kuin vastaavat teipatut ratkaisut. Erityisen huomattava ero oli useamman putken läpivienneissä, joista ei teippaamalla saatu lankaan hyväksyttävää tulosta.

4.4 Kipsilevyläpiviennit

Viimeisessä koesarjassa (kokeet 17–20) testattiin tiivistystä suoraan sisäverhouslevyyn. Kokeissa koekappaleen sisäpintaan lisättiin ilmansulun eteen 13 mm kipsilevy. Reiät läpivientejä varten tehtiin valmiiseen rakenteeseen jokaiselle putkelle erikseen soveltuvalla rasiaporanterällä. Terän halkaisija oli noin 20 mm putken halkaisijaa leveämpi, joten putken ympärille jäi noin 10 mm levyinen vaahdotusväli. Reikä porattiin kipsilevyn ja ilmansulun läpi villakerrokseen saakka. Kokeet toteutettiin sekä paperipohjaisella ilmansululla että höyrynsulkumuovilla. Molemmat ilmansulut leikkautuivat hyvin siististi reunoiltaan eikä niiden reunoilla havaittu repeämiä ennen putken asennusta (kuva 4.4.1).

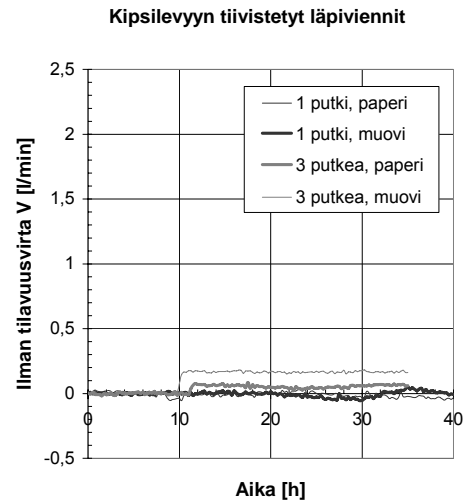


Kuva 4.4.1 Läpivientejä varten tarvittavat reiät tehtiin rasiaporalla (vasemmalla). Sekä paperipohjainen ilmansulku (keskellä) että höyrynsulkumuovi (oikealla) leikkautuivat siististi reunoiltaan.

Kokeet tehtiin sekä yksittäisille että useamman putken läpivienneille. Kolmen putken läpivienneistä tuli käytännössä yksittäisiä, koska kipsilevyyn jätettiin ehjät kannakset reikien välille (kuva 4.4.2). Läpivientiputket vaahdotettiin kipsilevyyn ja vaahdotus ulotettiin myös levyn taakse, missä se tiivisti ilmansulun reunat kipsilevyyn. Vaahdotusperiaate oli sama kuin edellisissä PUR-kauluksella toteutetuissa kokeissa (kokeet 13–16).



Kuva 4.4.2 Viimeisissä PUR-kauluksella toteutetuissa kokeissa tiivistyslevy asennettiin vain ilmansulun etupuolelle (vasemmalla). Kolmen putken läpivientien ilmanpitävyys oli hieman heikompi kuin yksittäisten putkien (oikealla).



Kaikista kipsilevyn tiivistetyistä läpivienneistä tuli hyvin tiiviitä (kuva 4.4.2). Rasiaporalla saadaan helposti tiivistettäviä läpivientejä valmiiseen rakenteeseen, mutta terien saatavuus voi rajoittaa läpivientiputkien kokoa.

4.5 Kooste läpivientien ilmanpitävyyskokeista

Koetuloksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että tulokset riippuivat hyvin paljon yksittäisen koejärjestelyn ja koekappaleen tiivistystyön onnistumisesta. Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla ei myöskään pystytty mittaamaan selvästi ilmaa läpäiseviä rakenteita 50 Pa paine-erolla, joten kaikki onnistuneiden kokeiden läpiviennit olivat lopulta hyvin tiiviitä. Pelkästään koekappaleesta aiheutuneeksi mittausvirheeksi voidaan arvioida $\pm 0,15$ l/min. Lisäksi asennuserot koekappaleiden välillä aiheuttivat merkittäviä eroja lähtöarvoina mitattuihin kalibrointiarvoihin. Tämän vuoksi koetuloksia ei pidä käyttää sellaisenaan tietyn tyyppisten läpivientitiivistysten ilmanpitävyyden arviointiin.

Taulukko 4.5.1 Läpivientien ilmanpitävyysskoekoiden vuotoilmavirrat 50 Pa paine-erolla. Tutkimustulokset pätevät ainoastaan testatuille koekappaleille.

Koekappale	Vuoto-ilmavirta (l/min)
3 Teipattu läpivienti, paperipohjainen ilmansulku	1,89
4 Teipattu läpivienti, höyrinsulkumuovi	0,63
5 Kolmen putken teipattu läpivienti	-
6 Läpivientilaippa paperipohjaisessa ilmansulkukalvossa	0,3
7 Läpivientilaippa höyrinsulkumuovissa	0,89
8 PUR-levy ilmansulkukalvon takana, reunat teipattu, yksi putki	0,19
9 PUR-levy ilmansulkukalvon takana, reunat teipattu, yksi putki	< 0,01
10 PUR-levy ilmansulkukalvon takana, reunat teipattu, kolmen putken läpivienti	3,85
11 Ilmansulku kahden PUR-levyn välissä, yksi putki	0,06
12 Ilmansulku kahden PUR-levyn välissä, kolmen putken läpivienti	0,02
13 PUR-levy ilmansulun edessä, paperipohjainen ilmansulku, yksi putki	0,97
14 PUR-levy ilmansulun edessä, höyrinsulkumuovi, yksi putki	0,04
15 PUR-levy ilmansulun edessä, paperipohjainen ilmansulku, kolmen putken läpivienti	1,07
16 PUR-levy ilmansulun edessä, höyrinsulkumuovi, kolmen putken läpivienti	< 0,01
17 Yhden putken tiivistys kipsilevyyn, paperipohjainen ilmansulku	< 0,01
18 Yhden putken tiivistys kipsilevyyn, höyrinsulkumuovi	< 0,01
19 Kolmen putken läpiviennin tiivistys kipsilevyyn, paperipohjainen ilmansulku	0,06
20 Kolmen putken läpiviennin tiivistys kipsilevyyn, höyrinsulkumuovi	0,17

Työn huolellisuudella on merkittävä vaikutus läpiviennin ilmanpitävyyteen riippumatta valitusta tiivistysmenetelmästä. Läpivientien ilmapuotojen vaikutus koko rakennuksen ilmapuotoiluun ei sen sijaan välttämättä ole merkittävä. Heikosti tiivistetyt läpiviennit aiheuttavat kuitenkin huomattavia paikallisia ilmapuotoja, joiden mukana rakenteisiin voi siirtyä huomattavia määriä kosteutta tai rakenteista voi tulla sisäilmaan epäpuhtauksia ja homeen aineenvaihduntatuotteita.

Kokeessa käytetyllä ilmansulkukalvolla ei havaittu olevan vaikutusta läpiviennin ilmanpitävyyteen. Kaikilla tiivistystavoilla oli koeolosuhteissa mahdollista saada aikaan hyvin ilmanpitäviä läpivientejä. Poikkeuksena tästä oli teippaamalla tiivistetty useamman putken läpivienti, jolle ei kokeissa saatu tulosta lainkaan. Yksittäisillä putkiläpivienneillä läpivientilaipat toimivat hyvin. Polyuretaanilevykauluksella ja vaahtotiivistyksellä ilmanpitävyys oli työteknisesti helpommin saavutettavissa, erityisesti kun kyseessä oli useamman putken läpivienti. Kokeissa käytetyt teipit eivät vastanneet nykyisiä vaatimuksia. Teippaustiivistyksiä käytettäessä tulee varmistaa, että käytetyllä teipillä on riittävä tartuntakyky ja pitkäaikaiskestävyys.

5 Ilmanpitävyyden ohjeita ja määräyksiä eri maissa

Suomessa ei ole rakentamismääräyksissä annettu raja-arvoa rakennuksen ilmanpitävyydelle. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C3 (RakMK C3 2007) kuitenkin suositellaan, että rakennuksen ilmavuotoluvun tulisi olla mahdollisimman lähellä arvoa 1 l/h. RakMK D3:n (2007) mukaisessa lämpöhäviöiden tasauslaskennassa vuotoilman aiheuttama lämpöhäviö otetaan huomioon. Perusarvona käytetään ilmavuotolukua 4,0 l/h. Pienempää ilmavuotoluvun arvoa voidaan käyttää, mikäli se pystytään osoittamaan mittaamalla kohde tai muulla tavalla. Tämän tutkimushankkeen yhteydessä on myös kehitetty laadunvalvontamenetelmää, jonka avulla talotoimittajat voisivat saada oikeuden käyttää ns. ilmoitettua ilmanpitävyyden arvoa tietyissä ennalta määritellyissä talotyypeissä (Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje 2009).

Eräissä muissa maissa on annettu määräyksiä ilmanpitävyyden raja-arvoista. Tanskassa rakentamismääräykset (Bygningsreglement 2008) vaativat, ettei ilmavuoto painekokeella tehtynä 50 Pa paine-erolla saa ylittää 1,5 l/s per rakennuksen lämmitetty lattia-ala. Rakennuksessa, jonka pinta-ala on 120 m² ja sisätilavuus 300 m³, tämä vastaa n₅₀-lukua 2,16 l/h. Tanskassa rakennusvalvonta voi rakennuslupaa anottaessa vaatia rakennuksen ilmanpitävyyden mittaamista. Rakennusvalvonnan tulee mittaattaa vähintään 5 % asunnoista, joille on myönnetty rakennuslupa.

Ruotsin nykyisissä rakentamismääräyksissä (Regelsamling för byggande, BBR 2008) ei ole vaatimusta ilmanpitävyydelle. Aiemmissä määräyksissä (Boverkets byggregler 2002) vaadittu q₅₀-luku asunnoilla oli 0,8 litraa/sm² ja muilla tiloilla 1,6 litraa/sm².

Norjassa rakennusten määräysten (Forskrift om krav til byggverk – TEK 2007) mukainen energiatehokkuus voidaan osoittaa täyttämällä vaatimukset eri rakenneosille, jolloin painekokeella 50 Pa paine-erossa mitatun ilmavuotoluvun tulee olla alle 2,5 l/h pientaloilla ja 1,5 l/h muilla rakennuksilla. Toinen tapa osoittaa energiatehokkuus on alittaa kokonais-energiankulutusvaatimukset. Tällöin ilmavuotoluvun tulee olla kuitenkin vähintään 3,0 l/h, paitsi hirsitaloilla, joilla ei ole vähimmäisvaatimusta.

Viron standardin (EVS 837-1:2003) mukaisesti q₅₀-luvun pitää olla asuinrakennuksilla (pien- ja kerrostalot) < 3 m³/(m²h) ja muilla rakennuksilla < 6 m³/(m²h). Tämä ilmanpitävyytaso on ollut voimassa vuodesta 1995 (EPN 11.1 1995). Rakennusten energiatehokkuuden todentamisessa (RTI, 28.12.2007, 72, 445) käytetään pientaloilla q₅₀-lukua 6 m³/(m²h) ja muilla rakennuksilla q₅₀-lukua 3 m³/(m²h). Näitä pienempiä arvoja voidaan kuitenkin käyttää, jos ilmanpitävyys osoitetaan mittaamalla tai muulla menettelyllä.

Saksassa rakennusten ilmanpitävyyteen on jo pitempään kiinnitetty huomiota. Energiatehokasta (ja ilmanpitävää) rakentamista tuetaan rahallisesti ja mittauksen tekeminen on tavanomaista. Saksassa rakennusten n₅₀-luvun tulee olla < 3 l/h tai < 1,5 l/h, mikäli niissä on koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä (DIN 4108-7: 2001-2008). Lämmitysenergiankulutuksen laskennassa todistettavasti määräykset täyttävälle rakennukselle saadaan pienempi lämpöhäviö.

Belgiassa rakennuksille ei ole varsinaista ilmanpitävyysmääräystä, mutta rakennuksen energiatehokkuuden laskennassa q_{50} -luvun perusarvo on $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ja sitä pienempää lukua voi käyttää, mikäli rakennukselle tehdään painekoe (<http://www.energiesparen.be>). Belgialaisessa standardissa (NBN D50/001) suositellaan n_{50} -luvun olevan $< 3 \text{ 1/h}$, mikäli rakennuksessa on koneellinen tulo-poisto ilmanvaihto ja $< 1 \text{ 1/h}$, mikäli talossa on tulo-poisto ilmanvaihto lämmöntalteenotolla.

Englannin ja Walesin uusissa rakentamismääräyksissä veloitetaan uusien rakennusten ilmanpitävyys toteamaan painekokeella. Rakennuksen katsotaan olevan riittävän ilmanpitävä, kun sen ilmanläpäisy-luku $q_{50} < 10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ (Approved documents L1A ja L2A 2006). Käytännössä rakennuksen tavoitehiilidioksidipäästöjen alittamiseksi, tulee rakennuksen ilmavuotoluvun raja-arvo joissain tapauksissa olla alle $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Mitattavaksi vaadittujen asuntojen määrä riippuu rakennushankkeessa tehtävien samanlaisten talotyyppien määrästä. Esimerkiksi mikäli saman talotyypin asuintaloja rakennetaan kerralla 4–40, riittää painekoe kahdessa talossa (Approved document L1A 2006). Vähemmän taloja voidaan mitata, mikäli rakennushankkeessa on sitouduttu käyttämään valmiita ja hyväksytyjä rakennedetaljeja. Pienillä asuinrakennustyömailla (korkeintaan 2 asuntoa) painekoetta ei ole pakko tehdä, mikäli voidaan osoittaa, että saman rakentajan tekemä vastaava talo on alittanut edellisen 12 kk aikana tehdyssä kokeessa vaaditun rajan, tai mikäli rakennuksen hiilidioksidipäästölaskelmissä käytetään lukua $q_{50} = 15 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Rakennuksissa, jotka eivät ole asuinrakennuksia, painekoetta ei ole pakko tehdä, jos: rakennuksen lattia-ala on alle 500 m^2 (käytetään $q_{50} = 15 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$) tai rakennus on kokonaan tehdasvalmisteinen ja sen ilmanpitävyys on todettu aiemmin mittaamalla tai mikäli rakennus on niin iso tai osastoitu, että sen mittaus on vaikeaa (Approved document L2A 2006).

Euroopan maiden ilmanpitävyysmääräyksiä ja suosituksia on koottu taulukkoon 5.1. Eri yksiköissä annetut ilmanpitävyyden raja-arvot on muutettu taulukossa vastaamaan 1-kerroksista vertailutaloa, jonka pinta-ala on $8 \text{ m} \times 15 \text{ m} = 120 \text{ m}^2$, sisätilavuus 300 m^3 ja vaipan pinta-ala 355 m^2 .

Taulukko 5.1 Joidenkin maiden ilmanpitävyydsmäärysten ja suositusten tasoja. Eri maiden tasot on sovitettu vertailukelpoisiksi n_{50} - ja q_{50} -luvuiksi esimerkkitalolle.

Maa	Ilmanpitävyyden raja-arvo	Vertailuarvo	
		n_{50} -luku[1/h] talolle, jonka $A=120 \text{ m}^2$, $V=300 \text{ m}^3$ ja $A_v=355 \text{ m}^2$	q_{50} -luku [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] talolle, jonka $A=120 \text{ m}^2$, $V=300 \text{ m}^3$ ja $A_v=355 \text{ m}^2$
Tanska	< 1,5 l/s/rakennuksen lattia-ala	< 2,2	< 1,8
Norja	< 2,5 1/h pientalot *	< 2,5 pientalot	< 2,1 pientalot
	< 1,5 1/h muut *	< 1,5 muut	< 1,3 muut
Ruotsi	–	–	–
Viro	< 3 $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ asuinrakennukset *	< 3,6 asuinrakennukset	< 3 asuinrakennukset
	< 6 $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ muut *	< 7,1 muut	< 6 muut
Saksa	< 3 1/h	< 3	< 2,5
	< 1,5 1/h kun kon. ilmanvaihto	< 1,5 kon. ilmanvaihto	< 1,3 kon. ilmanvaihto
Belgia	< 12 $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ * (perusarvo)	< 14,2 (perusarvo)	< 12 (perusarvo)
	< 3 1/h kun kon. ilmanvaihto	< 3 kon. ilmanvaihto	< 2,5 kon. ilmanvaihto
	< 1 1/h kun tulo-poisto LTO	< 1 kun tulo-poisto LTO	< 0,8 tulo-poisto LTO
Englanti ja Wales	< 10 $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ *	< 11,8	< 10

* Huom. Lue tarkemmat selostukset ilmanpitävyydsmäärysten soveltamisesta kappaleesta 5.

6 Yhteenveto

6.1 Kenttämittaukset

Tutkimuksessa tehtiin kenttämittauksia uudehkoissa massiivirakenteisissa pientaloissa sekä kerrostaloasunnoissa. Mittauksissa oli mukana 50 kivi- ja 20 hirsirakenteista pientaloa. Kerrostaloasunnoista 40 oli betonirakenteisissa ja 16 puurakenteisissa kerrostaloissa.

6.1.1 Ilmanpitävyys: painekokeet

Viiden vuoden aikana tehtyjen tutkimusten perusteella on saatu käsitys suomalaisten pientalojen ja kerrostaloasuntojen nykyisestä ilmanpitävyyden tasosta. Tässä tutkimuksessa mitattujen 10 kevytbetonitalon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 1,5 1/h (q_{50} : 1,7 m³/(hm²)), 10 kevytsoraharkkotalon 3,2 1/h (3,7 m³/(hm²)), 10 tiilitalon 2,8 1/h (3,0 m³/(hm²)), 10 betoniharkkotalon 1,6 1/h (1,9 m³/(hm²)), 10 betonielementtitalon 2,6 1/h (2,7 m³/(hm²)) ja 20 hirsitalon 6,0 1/h (5,7 m³/(hm²)). 20 betonielementtirakenteisen kerrostaloasunnon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 1,6 1/h. 23 kerrostaloasunnon, jossa välipohja oli paikalla valettu, n_{50} -lukujen keskiarvo oli 0,7 1/h. Puukerrostalojen 16 asunnon n_{50} -lukujen keskiarvo oli 2,6 1/h. Yhden mitatun kerrostalorapun ilmavuotoluku painekoelaitteistolla mitattuna oli 0,9 1/h ja kohteen omalla ilmanvaihtolaitteistolla 1,2 1/h. Koko kerrostalorapun ilmavuotoluku oli pienempi kuin kohteesta mitattujen yksittäisten asuntojen. Asuntojen ilmavuotoluvussa on mukana ilmavuodot asunnon ja viereisten asuntojen ja rappukäytävän välillä. Eri talotyyppien välisessä vertailussa on otettava huomioon, että ryhmien otokset olivat melko pienet.

Kivitalojen ilmanpitävyys (n_{50} -lukujen keskiarvo 2,3 1/h) oli keskimäärin parempi kuin hirsitalojen (6,0 1/h) ja aiemmassa tutkimuksessa (Vinha et al. 2005) mitattujen puurunkoisten talojen (3,9 1/h). Erot talotyyppien välillä tasoittuvat hieman, kun vertailu tehdään q_{50} -luvun avulla (kivitalot: 2,6 m³/(hm²), hirsitalot: 5,7 m³/(hm²) ja puurunkoiset talot: 3,9 m³/(hm²)). Hirsitaloissa, joissa hirsien välisenä saumaeristeinä oli käytetty uudenaikaisia tiiviimpiä saumaeristeitä (solukumi- tai muovieriste), oli keskimäärin parempi ilmanpitävyys kuin hirsitaloissa, joissa oli käytetty ns. perinteisiä saumaeristeitä (mineraalivilla, pellava, polypropeeni). Joissain näissä kohteista ilmanpitävyyteen saattoi myös vaikuttaa muut tekijät kuin saumaeriste (osassa kohteista oli esimerkiksi polyuretaanieristeinen yläpohja).

Tarkasteluun valitussa kivitalojen ryhmässä kivrakenteisella yläpohjalla toteutettujen talojen ilmavuotoluvut olivat keskimäärin pienempiä kuin puurakenteisella yläpohjalla toteutettujen talojen. Maanvastaisella betonilaatalla ja kivrakenteisella ryömintätalaisella alapohjalla toteutettujen talojen ilmavuotoluvuissa ei sen sijaan havaittu merkittävää eroa. Sama tulos havaittiin myös aiemmin mitattujen puurunkoisten pientalojen kohdalla. Useampikerroksisten kivi- ja hirsirakenteisten pientalojen ilmavuotoluvut olivat pienempiä kuin vastaavien yksikerroksisten pientalojen, kun vertailussa käytettiin n_{50} -lukuja. Aiemmin mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa tilanne oli päinvastainen. Ero johtui siitä, että puurunkoisissa pientaloissa välipohjan liitos ulkoseinään heikensi rakennuksen ilmanpitävyyttä merkittävästi. Kivi- ja hirsirunkoisissa pientaloissa n_{50} -lukujen pieneneminen johtui lähinnä sisätilavuuden

kasvusta, koska erot q_{50} -lukujen osalta olivat melko pieniä. Talotyyppien sisällä oli kuitenkin hajontaa ja rakentamisen laadulla, suunnittelulla, toteutuksella ja valvonnalla on suuri merkitys hyvän ilmanpitävyyden saavuttamisessa.

6.1.2 Lämpökamerakuvaukset

Tässä tutkimuksessa on selvitetty eri pientalojen ja kerrostaloasuntojen kylmäsiltoja ja ilmavuotopaikkoja. Tilastollisessa tarkastelussa kylmäsiltoja ja ilmavuodot luokiteltiin niiden sijaintipaikkojen ja tyyppien perusteella.

Vakavat kylmäsiltoja eivät ole Suomen uusien pientalojen tyyppiongelma. Tyypillisin kylmäsiltojen ja ilmavuotojen sijaintikohta oli ovien ja ikkunoiden liitoskohta sekä ovet ja ikkunat itse (jakauma $\sim 50\% / 50\%$). Normaaliolosuhteissa matalia pintalämpötiloja esiintyi pientaloissa myös ulkoseinien liitoksissa alapohjiin, välipohjiin, yläpohjiin ja ulkoseiniin sekä kerrostaloissa ulkoseinien liitoksissa alapohjiin.

Ilmavuodot olivat yleisiä tutkituissa pientaloissa. Pääasialliset ilmavuotokohtat olivat ulkoseinän ja yläpohjan liitoksissa, ovien ja ikkunoiden liitoksissa sekä ovissa ja ikkunoissa itsessään (jakauma $\sim 50\% / 50\%$), ulkoseinän ja välipohjan liitoksissa sekä ilmansulun läpivienneissä. Tyypilliset viivamaiset ilmavuodot (60 % vuodoista) viittaavat puutteelliseen rakennustekniikkaan, mutta ovat korjattavissa liitoksia ja työnsuoritusta kehittämällä.

6.1.3 Ilmanvaihto

Mitattujen pientalojen vallitsevana ilmanvaihtojärjestelmänä oli koneellinen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Tulokset olivat samansuuntaiset kuin ”Kosteusvarma terve pientalo” -tutkimushankkeessa koneellisen tulo-poiston osalta (Vinha et al. 2005). Ilmanvaihtokerrointen keskiarvo oli 0,38 1/h, joka oli alle Rakentamismääräyskokoelmassa D2 (2003) annetun suosituksen 0,5 1/h. 97 %:ssa kohteista 0,5 1/h ilmanvaihtokerroin olisi ollut saavutettavissa jollakin ilmanvaihtokoneen käyttöasennolla.

Makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat pientaloissa alhaiset. 42 %:ssa tapauksista tuloilmavirta oli alle 6 l/s kahden hengen makuuhuoneissa ja 94 %:ssa kohteista alle 12 l/s. Keskimääräinen tuloilmavirta oli 6,7 l/s.

Pientalojen ilmanvaihdon äänitasot olivat alhaiset ja sekä koneellisen poiston että tulo-poiston kohteissa (keskimäärin alle 22 dB(A) makuuhuoneista mitattuna). Vain yhdessä kohteessa äänenpainetaso oli käyttöasennossa 32 dB(A).

Kerrostalojen ilmanvaihtojärjestelmät jakoutuivat keskitettyyn koneelliseen poistoon, keskitettyyn koneelliseen tulo-poistoon ja huoneistokohtaiseen tulo-poistoon. Vain koneellisen poiston kohteissa kohteiden ilmanvaihtokerrointen keskiarvo jäi alle 0,5 1/h. Suurin keskiarvo oli keskitetyn koneellisen tulo-poiston ryhmällä 0,63 1/h. Tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetuissa kohteissa 80 %:ssa kohteista RakMK D2:n ohjearvo toteutui.

Makuuhuoneiden tuloilmavirrat olivat suurempia kuin pientalokohteissa. Keskiarvot olivat 11,1 l/s (keskitetty tulo-poisto) ja 6,6 l/s (huoneistokohtainen tulo-poisto). Kummankaan järjestelmän koekohteiden keskiarvo ei ylittänyt RakMK D2:n kahdenhengen makuuhuoneille asettamaa tuloilmanvirran ohjearvoa 6 l/s per henkilö.

Makuuhuoneiden äänenpainetasot kerrostaloasunnoissa olivat alhaisia. Keskiarvo oli 23 dB(A) kaikissa kohderyhmissä. Vain kahdessa kohteessa ylitettiin RakMK D2:n raja-arvo 28 dB(A).

6.1.4 Lämpö- ja kosteusolot

Asuintilojen sisälämpötilojen havaittiin olevan suositusarvoon nähden usein talvella liian korkeita. Sen sijaan kesällä sisälämpötilat eivät olleet SFS-EN 15251 (2007) -standardin mukaan ongelmallisia, jos asunnoissa on mahdollista käyttää kesällä ikkunatuuletusta ja valita vaatetus olosuhteiden mukaan. Keskimääräinen sisälämpötilan ulkolämpötilariippuvuus oli samanlainen kaikissa pientaloissa. Tulos oli myös samankaltainen kuin aiemmin mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa (Vinha et al. 2005). Pientalojen ulkovaippa ei täten vaikuta merkittävästi keskimääräiseen sisälämpötilaan. Tässä hankkeessa tutkituissa massiivirunkoisissa pientaloissa oli viileämpää kuin ”Kosteusvarma terve pientalo” tutkimushankeen puurunkoisissa taloissa. Toisaalta on otettava huomioon, että mittaus tehtiin eri vuosina ja myös ulkoilma oli selvästi viileämpi massiivirunkoisia pientaloja mitattaessa. Kerrostaloasunnoissa sisälämpötila oli merkittävästi korkeampi kuin pientaloissa. Samansuuntainen tulos saatiin myös aikaisemmassa sisäilmastomittauksessa 16 vuotta sitten (Ruotsalainen et al. 1992). Sisälämpötilan optimaalinen säätö ja kesällä aurinkosuojauksen käyttö sisältävät paljon energiansäästöpotentiaalia.

Keskimääräinen sisälämpötila pientaloissa kesällä oli 23,7 °C (taloista mitattujen kesäjaksen keskiarvojen vaihteluväli oli 20,7–26,0 °C) ja talvella 21,4 °C (taloista mitattujen talvijaksen keskiarvojen vaihteluväli oli 17,9–24,2 °C). Keskimääräinen sisäilman suhteellinen kosteus oli kesällä 52 % RH (taloista mitattujen kesäjaksen keskiarvojen vaihteluväli oli 43–61 % RH) ja talvella oli 31 % RH (taloista mitattujen talvijaksen keskiarvojen vaihteluväli oli 21–48 % RH).

Lämpötilan vuorokausiamplitudin keskiarvo vaihteli koekohteissa tyypillisesti välillä 0,5–2 °C. Massiivirunkoisissa pientaloissa vuorokauden lämpötilavaihtelu oli kesällä suurin hirsitaloissa. Tämä on selitettävissä hirsitalojen kivitaloja pienemmällä termisellä massalla. Aiemmassa tutkimuksessa mitatuissa puurunkoisissa pientaloissa kesäajan lämpötilavaihtelu oli samasta syystä vielä suurempaa, mutta kyseessä oli myös eri mittausvuosi. Talvella sisälämpötilan vaihtelu oli merkittävästi suurempaa niissä kohteissa, joissa oli sähköinen lattialämmitys verrattuna vesikeskuslämmitteisen lattialämmön kohteisiin. Sisäilman suhteellisen kosteuden ja vesihöyrypitoisuuden vuorokausiamplitudissa tutkittujen talotyypin välillä ei ollut merkittäviä eroja, paitsi kesäjaksolla, jolloin absoluuttisen kosteuden vaihtelu oli kevytbetonitaloissa keskimäärin tilastollisesti merkittävästi pienempää ja hirsitaloissa vastaavasti keskimäärin merkittävästi suurempaa kuin muutamissa muissa talotyypeissä. Kohteissa lämpötilan vaihtelulla oli isompi vaikutus suhteellisen kosteuden

tasoon kuin seinärakenteella. Sisustuksella ja ikkuna-tuuletuksella on myös todennäköisesti vaikutusta sisäilman olosuhteisiin.

Uuden sisäilmastoluokituksen (2008) mukaan talvijakso muuttuu kesäjaksoksi 15 °C ulkolämpötilan kohdalla ja sisäilman tavoitelämpötilat muuttuvat silloin merkittävästi. Mittaustulokset eivät kuitenkaan osoita näin jyrkkää muutosta. Standardin SFS-EN 15251 (2007) mukainen ei-jäähdytyn sisäilmaston tavoitelämpötilojen käyrästä vastaa paremmin suomalaisten kotien sisälämpötilaa.

6.1.5 Sisäilman kosteuslisä ja kosteuden tuotto

Rakenteiden kosteuslisän mitoitus varten sisäilman kosteuslisän arvo tulee valita läheltä taloissa esiintyvän kosteuslisän maksimiarvoa, jotta kaikkien talojen rakenteet tulisi mitoittua riittävän suurta kosteusrasitusta vastaan. Mittaustulosten perusteella kosteuslisän mitoitusarvon tulisi olla talviolosuhteissa (≤ 5 °C) pientaloissa 5,0 g/m³ (kosteusluokka 1) ja kerrostaloissa 4,0 g/m³ (kosteusluokka 2). Ulkolämpötilan noustessa kosteuslisän arvo laskee siten, että ≥ 15 °C kosteuslisän suositeltava mitoitusarvo on 2,0 g/m³ pientaloille ja 1,5 g/m³ kerrostaloille. Kosteusluokan 1 mitoitusarvot sopivat asunnoille, joissa on keskimääräistä suurempi asumistiheys (~ 30 m²/asukas), tyydyttävä ilmanvaihto (ilmanvaihtokerroin $\geq 0,3$ 1/h) ja/ tai asunnossa käytetään lisäkostutusta talvella siten, että suhteellinen kosteus on vähintään 25 % RH. Kosteusluokan 2 mitoitusarvot sopivat asunnoille, joissa on keskimääräinen tai sitä pienempi asumistiheys (~ 45 m²/asukas), hyvä ilmanvaihto (ilmanvaihtokerroin $\geq 0,4$ 1/h) eikä huoneistossa käytetä lisäkostutusta.

Koekohteissa tapahtunut kosteuden tuotto päivää kohti laskettiin viikoittaisista kosteuslisän keskiarvoista. Koekohteiden keskimääräinen kosteuden tuotto oli pientaloilla 8,5 kg/päivä ja kerrostaloasunnoilla 3,0 kg/päivä. Koekohteiden maksimikosteustuoton keskiarvot olivat 15,3 kg/päivä pientaloilla ja 5,7 kg/päivä kerrostaloilla. Korkein viikon keskimääräinen kosteuden tuotto oli 46,2 kg/päivä pientaloilla ja 12,6 kg/päivä kerrostaloilla. Mitattu kosteustuotto poikkesi merkittävästi asukaskyselyiden perusteella lasketusta kosteustuotosta.

6.1.6 Painesuhteet

Painesuhteiden hallitseminen ilmanvaihdolla onnistuu vain hyvin ilmanpitävässä talossa ($n_{50} < 0,4$ 1/h). Paine-olosuhteiden hallitseminen ilmanvaihdolla on vaikeaa talon ilmanpitävyyden ollessa keskimääräinen tai hatara ($n_{50} > 4$ 1/h). Tällöin tulo-poistoilmanvaihdon tavanomaiset ilmamäärät ovat liian pienet suhteessa vuotoilmamääriin.

Pientaloissa voi olla lähes jatkuvasti lattian korkeudella alipainetta ja katon korkeudella vastaavasti ylipainetta. Välipohjan tasolla voi olla joko alipainetta tai ylipainetta. Mitoituksessa käytettävä paine-ero tulee olla vähintään ± 10 Pa luokkaa. Kriittisimmissä tapauksissa (hyvin ilmanpitävä talo ja tasapainottamaton ilmanvaihto) paine-ero voi nousta jopa ± 30 Pa tasolle. Tuuli lisää paine-erojen huippuja, mutta keskimäärin erot ovat pienempiä.

Ilmanpitävyydeltään hyvän talon ilmanvaihto tulee tasapainottaa erittäin huolellisesti, jotta vältytään haitallisen suurilta paine-eroilta.

6.1.7 Energiankulutus

Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä hirsi- että kivirakenteisten pientalojen energiankulutusta. Tiedot pientalojen lämmitysmuodoista, lämmönjakojärjestelmistä ja energiankulutuksesta on saatu asukkaiden täyttämistä asukastietolomakkeista (liite 3). Lomakkeessa asukkaat ilmoittivat arvionsa vuoden aikana käyttämästään sähköenergiasta sekä öljy- ja polttopuutilavuudesta. Arviot ovat, kohteesta riippuen, joko vuodelta 2004 tai 2005. Keskimääräinen sähkönkulutus vuodessa oli lomakkeiden perusteella kaukolämmöllä lämpiävissä kohteissa 65,7 kWh/m² (25,2 kWh/m³), pääasiallisesti maalämpöpumpulla lämpiävissä kohteissa 86,3 kWh/m² (30,3 kWh/m³), suoralla sähköllä lämpiävissä kohteissa 159,5 kWh/m² (55,7 kWh/m³), varaavalla sähkölämmityksellä lämpiävissä kohteissa 157,0 kWh/m² (56,5 kWh/m³) ja öljyllä lämmitetyissä kohteissa 41,7 kWh/m² (17,2 kWh/m³). Sähkön kulutus sisältää kaiken sähkön mittarilukeman perusteella. Kaukolämpö- ja öljylämmitystaloja lukuun ottamatta sähkön kulutus sisältää myös lämmityksen ja lämpimän käyttöveden valmistuksen.

Keskimääräinen lämmitystarveluvuilla ja maantieteellisellä sijainnilla korjattu ostoenergiankulutus vuodessa oli pääasiallisesti maalämpöpumpulla lämpiävissä kohteissa 92,6 kWh/m² (32,5 kWh/m³), suoralla sähköllä lämpiävissä kohteissa 170,8 kWh/m² (59,7 kWh/m³) ja varaavalla sähkölämmityksellä lämpiävissä kohteissa 168,1 kWh/m² (60,5 kWh/m³). Luvut eivät sisällä puun käyttöä. Jos puuta käyttävissä koekohteissa käytetty keskimääräinen polttopuutilavuus (4,5 m³) katsotaan poltetuksi puupolttoaineita käyttävässä lämmöntuottolaitteessa 70 % vuosihyötysuhteella, on näissä kohteissa puusta saatu keskimäärin 24,0 kWh/(m² a) lämpönä sisätiloihin.

Pientalojen energiankulutus sisäpinta-alaa ja tilavuutta kohti vaihteli suuresti eri koekohteissa. Todennäköisimpänä selityksenä tähän ovat asukkaiden erilaiset kulutustottumukset.

6.1.8 Asukaskyselyn tuloksia

Selkeästi yleisimmäksi pientalojen sisäilmasto-ongelmaksi koettiin pölyiset pinnat. Riittämätön ilmanvaihto kesällä ja ilmanvaihtomelu olivat yleisimmät ilmanvaihtoon liittyvät ongelmat. Kylmät lattiat ja vaihteleva huonelämpötila olivat keskeiset lämpöolo-ongelmat. Pölyinen ja liian lämmin huoneilma oli yleisin useasti esiintyvä sisäilmaongelma.

Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys pientaloissa oli hieman alhaisempi kuin 100 pientaloasunnon tutkimuksessa. Merkittävin lasku oli pölyisten pintojen ja kesäajan riittämättömän ilmanvaihdon esiintyvyydessä. Ilmanvaihtomelun esiintyvyys kasvoi hieman, mutta samalla koneellisten tuloilmajärjestelmien osuus otoksessa kasvoi 61 %:sta lähes 100 %:iin vuodesta 2004. Verrattuna 100 pientaloasunnon tutkimukseen vähintään kerran viikossa esiintyvien sisäilmaongelmien esiintyvyys oli selvästi alhaisempi.

Äänitasot niiden pientalojen makuuhuoneissa, joissa asukkaiden mukaan esiintyi ilmanvaihtomelua, olivat jossain määrin korkeammat kuin niiden asuntojen makuuhuoneissa, joissa ei esiintynyt ilmanvaihtomelua.

Hirsi- ja kivirakenteisten talojen väliset erot olivat pieniä ja vaihtelevia. Kivirakenteisissa taloissa ilma koettiin tunkkaisemmaksi (18 %) kuin hirsitaloissa (0 %). Hirsitaloissa esiintyi vähemmän valituksia ilmanvaihtomelusta (5 %) kuin kivitaloissa, vaikka lähes kaikissa hirsitaloissa oli koneellinen ilman sisäänpuhallus.

Selkeästi yleisimmäksi sisäilmasto-ongelmaksi kerrostaloasunnoissa koettiin pölyiset pinnat sekä ilmanvaihdon riittämättömyys kesällä. Riittämätön ilmanvaihto kesällä, ilman tunkkaisuus, ilmanvaihtomelu ja kylmät lattiat olivat lisäksi vähintään 20 % yleisyydellä esiintyneet ongelmat. Liian lämmin sisäilma oli keskeisin useasti esiintyvä ongelma. Ilman pölyisyys, kuivuus ja veto olivat seuraavat keskeiset usein esiintyvät ongelmat.

Keskimääräinen ilmanvaihtokerroin oli puukerrostaloissa 0,40 1/h ja betonikerrostaloissa 0,57 1/h. Lattioiden kylmyyttä (87 %) ja vaihtelevaa huonelämpötilaa (70 %) esiintyi huomattavan yleisesti puukerrostaloissa. Myös tunkkaisen ilman esiintyvyys oli näissä taloissa 70 %:n tasoa. Pölyisiä pintoja ja ilmanvaihdon riittämättömyyttä esiintyi puukerrostaloissa enemmän kuin betonitaloissa. Puukerrostalot koettiin myös vetoisammiksi. Ilmanvaihtomelua esiintyi betonikerrostaloissa enemmän kuin puukerrostaloissa, koska koneellinen sisäänpuhallus oli yleisempi betonikerrostaloissa. Tulosten yleistettävyyttä rajoittaa puukerrostalo-otoksen pienuus, vain 16 asuntoa.

6.2 Vuotoilmanvaihdon mallinnus

Vuotoilmanvaihdon mallinnuksen avulla tutkittiin rakennuksen vaipan ilmapitävyyden vaikutusta rakennuksen keskimääräiseen vuotoilmanvaihtokertoimeen ja energiankulutukseen Suomen olosuhteissa. Tässä tutkimuksen osassa keskityttiin pääosin pientalojen vuotoilman mallinnukseen, mutta myös kerrostalon vuotoilmanvaihtuvuutta tutkittiin kahdessa yksittäisessä tapauksessa. Simulointitutkimuksen perusteella rakennuksen vuotoilmanvaihtokerroin kasvaa lähes lineaarisesti ilmavuotoluvun n_{50} kasvaessa. Simulointituloksista johdettua yksinkertaistettua vuotoilmavaihtokertoimen laskentamallia voidaan käyttää koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetun pientalon keskimääräisen vuotoilmanvaihtokertoimen karkeaan arviointiin Suomessa. Vuotoilmanvaihtokertoimen korjaus energialaskentaa varten voidaan tehdä jakamalla keskimääräinen vuotoilmavaihtokerroin korjauskertoimella 0,9. Tällöin vuotoilmanvaihtokertoimen laskentakaava energialaskentaa varten tyypilliselle ilmastovyöhykkeillä (I–III) suojaisissa tuulioloissa tasapainoisella ilmanvaihtojärjestelmällä varustetulle 1-kerroksiselle pientalolle on $n_{50}/39$ ja 2-kerroksiselle pientalolle $n_{50}/24$. Vastaavasti kerrostalon vuotoilmanvaihtokerroin energialaskentaa varten on $n_{50}/17$. Keskimäärin 2-kerroksisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiankulutus kasvaa 7 % ja kokonaisenergiankulutus 4 %, kun ilmavuotoluku n_{50} kasvaa yhden yksikön verran.

6.3 Läpivientien ilmapitävyyskokeet

Putkiläpivientien eri tiivistystapojen ilmapitävyyttä testattiin puurankarakenteessa TTY:n rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla. Kokeissa vertailtiin teippaamalla tai

läpivientilaipalla tiivistettyjen koekappaleiden ilmanpitävyyttä polyuretaanivaahdolla ja levykauluksella tiivistettyjen läpivientien ilmanpitävyyteen. Rakenteen yli aiheutettiin kokeissa 50 Pa paine-ero. Kokeissa ei testattu tiivistystapojen pitkäaikaiskestävyyttä.

Ehjän paperipohjaisen ilmansulkukalvon ja höyrynsulkumuovin ilmanpitävyyden välillä ei ollut eroja. Myöskään läpivientikokeissa ei käytetyn ilmansulkukalvon huomattu vaikuttavan merkittävästi lopputulokseen. Kaikilla tiivistystavoilla oli koeolosuhteissa mahdollista saada aikaan hyvin ilmanpitäviä läpivientejä. Ainoastaan teippaamalla tiivistetystä useamman putken läpiviennistä ei saatu lainkaan tulosta, koska ilman virtaus läpiviennin kohdalta oli niin suuri, että paine-eroa ei kyetty nostamaan 50 Pa:iin. Yksittäisillä putkiläpivienneillä läpivientilaipat toimivat hyvin ja tiivis ratkaisu oli niillä helpommin saavutettavissa kuin teippaamalla. Useamman putken läpivienneissä polyuretaanikauluksilla sekä vaahdottamalla tiivistystyö on myös melko helposti toteutettavissa. Riippumatta valitusta tiivistysmenetelmästä työn huolellisuudella on merkittävä vaikutus lopulliseen ilmanpitävyyteen.

6.4 Suositeltavan ilmavuotoluvun määrittäminen teknisin perustein

Tutkimuksen eräänä tavoitteena oli selvittää onko olemassa teknisiä perusteita sille, että jokin tietty ilmavuotoluvun arvo asetettaisiin tavoitearvoksi. Tällaisia perusteita voisivat olla esim. energiankulutuksen väheneminen, kosteuden kondensoitumis- ja homehtumisriskin väheneminen rakenteissa tai vedontunteen väheneminen.

Luvussa 3 todettiin, että rakennuksen energiankulutus vähenee varsin lineaarisesti ilmavuotoluvun pienentyessä. Näin ollen energiankulutuksen osalta ei ole löydettävissä sellaista ilmavuotoluvun arvoa, jonka jälkeen energiankulutus alkaisi vähentyä voimakkaammin.

Ilmavuotoluvun vaikutuksia kosteuden kondensoitumis- ja homehtumisriskiin tarkasteltiin TTY:ssä aikaisemmin saatujen tutkimustulosten perusteella (Vinha ja Käkälä 2001) sekä TKK:n LVI-laboratoriossa tehtyjen tutkimusten perusteella (Kalamees & Kurnitski 2008). Yhteenvetona koetuloksista voidaan todeta, että hyvin pieni reikä tai rako voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista rakenteeseen, jos kosteus virtaa sisältä ulospäin ylipaineen vaikutuksesta. Esim. TTY:n tutkimuksissa puurunkoisessa seinässä oli 3 kpl halkaisijaltaan 3,5 mm reikiä höyrynsulun ja sisälevyn läpi. Kun sisäpuolelle laitettiin 10 Pa ylipaine, tuulensuojalevyn pintaan alkoi kondensoitua kosteutta jo 1 vrk kuluttua talviolosuhteissa. Jos oletetaan, että pieni reikä tai rako olisi rakennusvaipan ainoa ilmavuotokohta, saataisiin rakennuksen ilmavuotoluvun arvoksi hyvin pieni luku ($\ll 0,1$ l/h). Näin ollen ilmavuotoluvun arvon tulisi olla käytännössä 0 l/h, jotta voitaisiin varmistua siitä, että vaippaan ei kondensoidu kosteutta tai aiheudu homehtumisriskiä sisällä olevan ylipaineen vaikutuksesta. Koska tämä ei ole mahdollista, ei ilmavuotoluvulle n_{50} ole löydettävissä järkevää raja-arvoa, joka takaisi rakenteen moitteettoman kosteusteknisen toiminnan ylipainetilanteessa.

Puurunkoisia pientaloja käsittelevän tutkimuksen yhteydessä (Vinha et al. 2005) todettiin, että vedontuntemuksen ei todettu korreloivan rakennuksen ilmavuotolukuun. Sen sijaan niissä rakennuksissa, joissa ilmavuotoluku oli suurempi kuin 6 l/h esiintyi enemmän valituksia kylmistä lattioista ja vaihtelevammasta huonelämpötilasta kuin tiiviimmissä rakennuksissa. Tällä perusteella ilmavuotoluvun raja-arvoksi voitaisiin valita luku 6 l/h, mutta se on käytännössä liian suuri tulevaisuuden energiasäästötarpeita ajatellen.

Luvussa 2.7 tarkasteltiin myös sitä, kuinka vaipan ilmavuotoluku vaikuttaa ilmanvaihdon avulla tehtävään paine-erosuhteiden hallintaan. Tutkimustulokset osoittivat, että ilmavuotoluvun tulee olla tyypillisesti alle 0,4 l/h, jotta ilmanvaihtoa säätämällä voidaan vaikuttaa paine-erosuhteisiin merkittävästi. Ylipäätään ilmanvaihdon säätötoimenpiteillä alkoi olla paine-erosuhteiden kannalta merkitystä silloin, kun vaipan ilmavuotoluku oli alle 2,0 l/h. Tällä perusteella ilmavuotoluvun tavoitearvon tulisi olla selvästi alle 1,0 l/h, jotta rakennuksen paine-eroja voitaisiin säätää hallitusti. Toisaalta tiivis rakennusvaippa myös edellyttää ilmanvaihdon huolellista säätämistä, koska muussa tapauksessa rakennukseen voi tulla suuria yli- ja alipaineita, jotka voivat aiheuttaa paikallisessa vuotokohdassa kosteusvaurioriskin tai tuoda sisäilmaan haitallisia yhdisteitä ja mikrobeja vaipasta tai sen ulkopuolelta.

Yhteenvetona edellä kerrotusta voidaan todeta, että ilmavuotoluvulle on vaikea määrittää jotakin tiettyä tavoitearvoa teknisillä perusteilla. Mitä pienempi ilmavuotoluku on, sitä vähäisempää on rakennuksen energiankulutus ja sitä pienempi on riski rakenteissa syntyville kosteusvaurioille tai haitallisten aineiden kulkeutumiselle vaipan läpi sisäilmaan. Tässä mielessä nykyisissä rakentamismääräyksissä annettu suositusarvo 1,0 l/h on hyvä tavoitearvo.

Lähteet

- Aho, H. & Korpi, M. (toim.). 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tutkimusraportti 141, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- 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*, Vol. 14 (1), pp. 55-64.
- Angell, W.J. 1988. Home Moisture Sources. CD-FS-3396 – 1988. University of Minnesota.
- Approved document L1A. 2006. The Building regulations 2000, Approved document L1A, conservation of fuel and power in new dwellings, 2006 edition. 39 s. http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_ADL1A_2006.pdf. Viitattu 26.8.2008
- Approved document L2A. 2006. The Building regulations 2000, Approved document L1A, conservation of fuel and power in new buildings other than dwellings, 2006 edition. 39 s. http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_ADL2A_2006.pdf. Viitattu 26.8.2008
- Asumisterveysohje. 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1, Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki.
- Boverkets byggregler – BBR 15. 2008. Boverket, Karlskrona. <http://www.boverket.se/templates/Page.aspx?id=3624&epslanguage=SV>. Viitattu 7.8.2008.
- Boverkets byggregler, BBR. 2002. Boverkets byggregler 1993:57 med ändringar till och med 2002:19. Boverket. 139 s.
- BS 5250. 1989. British Standard Code of practice for Control of condensation in buildings. British Standard Institution.
- Buchanan, C., Sherman, M. 2000. A mathematical model for infiltration heat recovery, Lawrence Berkley Laboratory Report, LBL-44294, Berkley, USA.
- Bygningsreglement 2008. Erhvervs- og Byggestyrelsen, Kööpenhamina. http://www.ebst.dk/br08.dk/BR07_00/0/54/0. Viitattu 7.8.2008.
- CIBSE. 1999. Guide A: Environmental Design. Chartered Institution of Building Services Engineers.
- CR-1752. 1998. "Ventilation For Buildings", Design for Indoor Environments, Brussels: CEN.
- DIN 4108-7: 2001-2008. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele.

EN ISO 13788. 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods.

EN ISO 13789. 2008. Thermal performance of buildings, Transmission and ventilation heat transfer coefficients, Calculation methods.

EPN 11.1, Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded. 1995. Eesti Ehitusteabe Fond.

EVS 837-1:2003. Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded. 2003. Eesti Standardikeskus.

Forskrift om krav til byggverk – TEK. 2007. Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK). <http://www.lovdatab.no/cgi-wif/ldles?doc=/sf/sf/sf-19970122-0033.html>. Tullut voimaan 1.7.1997, muutettu 26.1.2007. Viitattu 8.8.2008. Kommunal- og regionaldepartementet, Norge.

<http://www.energiesparen.be>. Viitattu 1.9.2008.

Jokisalo, J., Kurnitski, J., Vuolle, M. & Torkki, A. 2003. Performance of Balanced Ventilation with Heat Recovery in Residential Buildings in a Cold Climate. *The International Journal of Ventilation*, 2 (3). pp.223-236.

Jokisalo, J., Kalamees, T., Kurnitski, J., Eskola, L., Jokiranta, K. & Vinha, J. 2008. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*, Vol. 32 (1), pp. 67-89

Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T. & Vinha, J. 2007a. Building Leakage, Infiltration and Energy Performance Analyses for Finnish Detached Houses. *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 377–387.

Jokisalo, J., Kurnitski, J., Kalamees, T., Eskola, L. & Jokiranta, K. 2007b. Ilmanpitävyyden vaikutus vuotoilmanvaihtoon ja energiakulutukseen pientaloissa. *Sisäilmastoseminaari 2007*. SIY raportti 25, Sisäilmätieto Oy.

Kalamees, T. 2007. Kosteuskuormien vaikutus lämpötilaindeksin raja-arvoon. *Rakennusfysiikka 2007*. Tampere.

Kalamees, T. & Kurnitski, J. 2008. Moisture convection performance of wall and attic floor joint. In: *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Copenhagen, Denmark, June 16–18, Vol. 2, pp.777–784.

Kilpeläinen, M., Luukkonen, I., Vinha, J. & Käkelä, P. 2000. Heat and moisture distribution at the connection of floor and external wall in multi-storey timber frame houses. *World Conference on Timber Engineering Whistler Resort, British Columbia, Canada July 31–August 3*.

Koch, A.P. 1986. *Fugt i boligen*. Danish Technological Institute.

Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT tiedotteita 1991.

Kurnitski, J., Kettunen, A-V., Matilainen, M., Smolander, J. & Sääksvuosi, P. 1998. Ryömintätilan tuuletus ja kosteuskäyttäytyminen, Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio. Raportti B59. Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu 88. 213 s.

Mattson, J., Carlson, O.E. & Engh, I.B. 2002. Negative influence on IAQ by air movement from mould contaminated constructions into buildings, Proceedings of Indoor Air 2002, Vol. 1, Monterey, CA, USA, Vol. 1, pp. 764–769.

NBN D50/001. 1991. Ventilatie voorzieningen in woongebouwen, Belgian Institute for Standardisation, Brussels.

Ojanen, T. & Kumaran, K. 1996. Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behaviour of a Residential Wall Assembly. Journal of Thermal Envelope and Building Science. Vol. 19, pp. 215-227.

Olesen, B.W. & Parsons, K.C. 2002 Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 537-548.

Palonen, J., Kurnitski, J. & Seppänen, O. 2007. The performance of ventilation systems in apartment buildings. Clima 2007, Helsinki 10–13th June.

Palonen, J., Seppänen, O., Kurnitski, J., Saarela, K., Tirkkonen, T. & Järnström, H. 2005. Toimistorakennusten ja asuinkerrostalojen energiatalous ja sisäilmasto 9 EU-maassa 2002–2005. (HOPE-projekti). Sisäilmastoseminaari 2005. Sisäilmayhdistys, raportti 23, s. 31-36.

RakMK C3. 2007. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D2. 2003. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D3. 2007. Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

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. +. 6 liites.

RT 14-10850. 2005. Rakennuksen lämpökuvaus. Rakenteiden lämpötekniinen toimivuus.

RTI, 28.12.2007, 72, 445 Energiatõhususe miinimumnõuded. Vabariigi Valitsuse määrus nr 258 20.12.2007.

Ruotsalainen, R., Rönnerberg, R., Säteri, J., Majanen, A., Seppänen, O. & Jaakkola, J.J.K. 1992. Indoor Climate and the Performance of Ventilation in Finnish Residences. *Indoor Air*, Vol. 2, pp. 137-145.

Sanders, C. 1996. IEA-Annex 24 HAMTIE, Final Report, Volume 2, Task 2: Environmental conditions. Laboratorium Bouwfysica, K.U.-Leuven, Belgium.

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 s.

SFS 5907. 2004. Rakennusten akustinen luokitus, Suomen standardisoimisliitto SFS, 9.6.2004. 34 s.

SFS-EN 15251. 2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Sisäilmastoluokitus 2000. 2001. Sisäilmayhdistys, Rakennustietosäätiö, Suomen Toimitila- ja Rakennuttajaliitto, Suomen Arkkitehtiliitto, Suunnittelu- ja Konsulttitoimistojen liitto. Helsinki.

Sisäilmastoluokitus 2008. 2008. Sisäilmayhdistys, Rakennustietosäätiö, Suomen Toimitila- ja Rakennuttajaliitto, Suomen Arkkitehtiliitto, Suunnittelu- ja Konsulttitoimistojen liitto. Helsinki.

SS 02 15 51. 1987. Byggnader – Bestämning av lufttäthet. Standardiseringskommissionen i Sverige. 8 s.

Tammelin, B. & Erkiö, E. 1987. Energialaskennan säätiedot – suomalainen testivuosi. Ilmatieteen laitos, Sääosasto – Teknillinen klimatologia. Raportti 7. Helsinki.

Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. RT-kortti, Rakennustieto Oy (julkaistaan vuonna 2009).

Trechsel, H.R. 1994. Moisture Control in Buildings. ASTM manual series, Manual 18. American Society for Testing and Materials.

Van der Linden, A.C, Boerstra, A.C., Raue, A.K. & Kurvers S.R. 2002. Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response, *Energy and Buildings*, 34, s. 737-744.

Venäläinen, A., Tammelin, B. & Sarkkula, S. 2004. Tilastoja lämmitystarveluvusta Suomessa 1971-2000. Ilmastotilastoja Suomesta 2004:2.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, M., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötila-olosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio. 102 s. + 10 liites.

Vinha, J. & Käkälä, P. 2001. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Julkaisu 96, 3. painos, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, 81 s. + 29 liites.

Virtanen, M. 1993. Thermal coupling of leakage air and heat flows in buildings and in building components. PhD Thesis. VTT Technical Research Centre of Finland, HVAC-laboratory, Espoo, Finland.

Vuolle, M. & Sahlin, P. 2000. IDA indoor climate and energy - a new-generation simulation tool. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Espoo, Finland. Vol. 2, pp. 523-528.

Liitteet

Liite 1	Pientalokoekohteiden perustiedot, taulukko	2 s.
Liite 2	Kerrostalokoekohteiden perustiedot, taulukko	2 s.
Liite 3	Pientalokoekohteiden asukaskyselylomake	8 s.
Liite 4	Kerrostalokoekohteiden asukaskyselylomake	6 s.
Liite 5	Pientalokoekohteiden q ₅₀ -luvut	1 s.

Pientalokoekohteiden perustiedot

NRO	Talon valmistusvuosi	Kerroskia	Ilmanvaihtojärjestelmä	Seinä rakenne	Rakennuksen yläpohja	Puurunkoisen yläpohjan höyrynsulku	Alapohja
3101	2004	1	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3102	2005	2	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	muovi	maanv. laatta
3103	1998	1,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3104	2003	1,5	kon p	lamellihöylähirsi	puurak.	polyuretaani	maanv. laatta
3105	1997	1,5	kon p	höylähirsi + sisäp. lämmöneristys	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3106	1997	1	kon t+p	pyöröhirsi	puurak.	muovi	maanv. laatta
3107	2001	1	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3108	2002	1,5	kon p	höylähirsi + ulkop. lämmöneristys	puurak.	rakennuspaperi	tuul. puurak.
3109	2001	2	kon t+p	höylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3110	2006	2	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3111	2004	1	kon t+p	höylähirsi + sisäp. lämmöneristys	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3112	2006	1,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	bitumipaperi	maanv. laatta
3113	2006	2,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	polyuretaani	maanv. laatta + tuul. puurak.
3114	2005	1,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3115	2004	1,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	polyuretaani	tuul. puurak.
3116	2004	1	kon t+p	pyöröhirsi	puurak.	muovi	tuul. puurak.
3117	2006	1,5	kon t+p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3118	2006	1	kon t+p	höylähirsi	puurak.	muovi?	maanv. laatta
3119	2003	1	kon p	lamellihöylähirsi	puurak.	rakennuspaperi	maanv. laatta
3120	2004	1	kon t+p	höylähirsi + sisäp. lämmöneristys	puurak.	muovi	maanv. laatta
3201	2001	1	kon t+p	kevytbetoni	puurak.	muovi	tuul. kevytbet.rak.
3202	2001	2	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		Tuul. kevytbet.rak.
3203	2002	3	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3204	2000	1	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		tuul. kevytbet.rak.
3205	1999	2,5	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3206	2000	2	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3207	2001	2,5	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3208	1999	1	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3209	2000	2	kon t+p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		tuul. kevytbet.rak.
3210	1996	1,5	kon p	kevytbetoni	kevytbetonirak.		maanv. laatta
3301	2004	1	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3302	2004	2,5	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3303	2005	1	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3304	2003	2	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3305	2004	1,5	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	tuul. betonirak.
3306	2005	2	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3307	2006	2	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3308	2004	2	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3309	2006	2	kon t+p	kevysoraharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3310	2005	2,5	kon t+p	kevysoraharkko	betonirak.		maanv. laatta
3401	2003	2,5	kon t+p	kalkkiahiekkatiili	puurak.	polyuretaani	maanv. laatta
3402	1997	2,5	kon t+p	kalkkiahiekkatiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3403	2002	1	kon t+p	poltettu tiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3404	2002	1	kon t+p	kalkkiahiekkatiili	puurak.	muovi	maanv. laatta

NRO	Talon valmistusvuosi	Kerrosia	Ilmanvaihtojärjestelmä	Seinä rakenne	Rakennuksen yläpohja	Puurunkoisen yläpohjan höyrynsulku	Alapohja
3405	1997	1	kon t+p	kalkkiahiekkatiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3406	2005	2	kon t+p	poltettu tiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3407	1999	2	kon t+p	poltettu tiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3408	2005	2,5	kon t+p	kalkkiahiekkatiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3409	2002	2	kon t+p	poltettu tiili	puurak.	muovitettu paperi	maanv. laatta
3410	2005	1	kon t+p	poltettu tiili	puurak.	muovi	maanv. laatta
3501	2003	1,5	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3502	2003	1	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3503	2004	1,5	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3504	2003	2	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3505	2004	1	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3506	2005	2	kon t+p	betoniharkko	betonirak.		maanv. laatta
3507	2003	1,5	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3508	2003	2,5	kon t+p	betoniharkko	betonirak.	muovi	maanv. laatta
3509	2004	2	kon t+p	betoniharkko	puurak.	muovi	maanv. laatta
3510	2005	2,5	kon t+p	betoniharkko	betonirak.		maanv. laatta
3601	1997	2	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	tuul. betonirak.
3602	2004	1	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	maanv. laatta
3603	2003	1	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	tuul. betonirak.
3604	2004	1	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	maanv. laatta
3605	2000	2,5	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	maanv. laatta
3606	2004	2,5	kon t+p	betonielementti	betonirak.		maanv. laatta
3607	2004	2	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	tuul. betonirak.
3608	1999	1	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	tuul. betonirak.
3609	1999	1,5	kon t+p	betonielementti	puurak.	muovi	maanv. laatta
3610	2005	3	kon t+p	betonielementti	betonirak.		maanv. laatta

Kerrostaloasuntokoekohteiden perustiedot

NRO	Talon valmistusvuosi	Kerros	Talon kokonaiskerrosmäärä	Taloryhmä	Asunnon pinta-ala	Ilmanvaihtojärjestelmä
4101	2005	5	5	betonielementti	77,0	kon. p
4102	2005	5	5	betonielementti	73,0	kon. p
4103	2005	4	5	betonielementti	73,0	kon. p
4104	2005	3	5	betonielementti	43,0	kon. p
4105	2005	2	5	betonielementti	84,0	kon. p
4201	2005	5	5	betoni - paikalla valettu vp	57,0	huoneistokoht. kon t+p
4202	2005	3	5	betoni - paikalla valettu vp	57,0	huoneistokoht. kon t+p
4203	2005	2	5	betoni - paikalla valettu vp	57,5	huoneistokoht. kon t+p
5101	2005	7	7	betonielementti	88,0	huoneistokoht. kon t+p
5102	2005	5	7	betonielementti	88,0	huoneistokoht. kon t+p
5103	2005	3	7	betonielementti	88,0	huoneistokoht. kon t+p
5201	2001	5	7	betonielementti	70,0	keskitetty kon t+p
5202	2001	4	7	betonielementti	70,0	keskitetty kon t+p
5203	2001	1	7	betonielementti	70,0	keskitetty kon t+p
5301	2004	2	4	betonielementti	87,5	kon. p
5302	2004	1	4	betonielementti	35,0	kon. p
5303	2004	1	4	betonielementti	43,5	kon. p
5401	2004	5	5	betonielementti	89,0	huoneistokoht. kon t+p
5402	2004	4	5	betonielementti	110,5	huoneistokoht. kon t+p
5403	2004	1	5	betonielementti	122,0	huoneistokoht. kon t+p
6101	2002	6	6	betoni - paikalla valettu vp	39,0	kon. p
6102	2002	4	6	betoni - paikalla valettu vp	39,0	kon. p
6103	2002	3	6	betoni - paikalla valettu vp	39,0	kon. p
6104	2002	1	6	betoni - paikalla valettu vp	38,0	kon. p
6105	2002	1	6	betoni - paikalla valettu vp	39,0	kon. p
6201	2005	6	7	betoni - paikalla valettu vp	138,0	keskitetty kon t+p
6202	2005	4	7	betoni - paikalla valettu vp	108,0	keskitetty kon t+p
6203	2005	2	7	betoni - paikalla valettu vp	108,0	keskitetty kon t+p
6301	2005	6	6	betoni - paikalla valettu vp	41,5	huoneistokoht. kon t+p
6302	2005	4	6	betoni - paikalla valettu vp	60,0	huoneistokoht. kon t+p
6303	2005	1	6	betoni - paikalla valettu vp	60,0	huoneistokoht. kon t+p
6401	2005	4	5	betoni - paikalla valettu vp	74,0	huoneistokoht. kon t+p
6402	2005	2	5	betoni - paikalla valettu vp	47,5	huoneistokoht. kon t+p
6403	2005	1	5	betoni - paikalla valettu vp	51,5	huoneistokoht. kon t+p
6501	2004	8-9	9	betoni - paikalla valettu vp	126,5	keskitetty kon t+p
6502	2004	6	9	betoni - paikalla valettu vp	75,5	keskitetty kon t+p
6503	2004	2	9	betoni - paikalla valettu vp	75,5	keskitetty kon t+p
6601	2006	4	4	betoni - paikalla valettu vp	58,5	keskitetty kon t+p
6602	2006	2	2	betoni - paikalla valettu vp	76,0	keskitetty kon t+p
6603	2006	1	4	betoni - paikalla valettu vp	58,5	keskitetty kon t+p
7101	2005	4	4	puurakenteinen	84,0	huoneistokoht. kon t+p
7102	2005	4	4	puurakenteinen	76,0	huoneistokoht. kon t+p
7103	2005	3	4	puurakenteinen	84,0	huoneistokoht. kon t+p
7104	2005	3	4	puurakenteinen	76,0	huoneistokoht. kon t+p
7105	2005	2	4	puurakenteinen	84,0	huoneistokoht. kon t+p
7201	1997	1	2	puurakenteinen	75,5	kon. p
7202	1997	2	2	puurakenteinen	88,0	kon. p
7203	1997	2	2	puurakenteinen	79,0	kon. p
7204	1997	1	2	puurakenteinen	54,0	kon. p
7301	1999	5	4	puurakenteinen	75,5	kon. p

NRO	Talon valmistusvuosi	Kerros	Talon kokonaiskerrosmäärä	Taloryhmä	Asunnon pinta-ala	Ilmanvaihtojärjestelmä
7302	1999	4	4	puurakenteinen	75,5	kon. p
7303	1999	3	4	puurakenteinen	75,5	kon. p
7304	1999	2	4	puurakenteinen	75,5	kon. p
7305	1999	1	4	puurakenteinen	75,5	kon. p
7401	2000	3	4	puurakenteinen	75,0	kon. p
7402	2000	4	4	puurakenteinen	74,0	kon. p

Tämän lomakkeen kysymykset koskevan rakennuksen sisäilmastoa, rakennustekniikkaa, teknisiä järjestelmiä sekä energian ja veden kulutustietoja.

Ne kysymykset, joihin ette tiedä vastausta tai ette osaa vastata, voi jättää väliin.

ASUKASTIEDOT

Kuinka kauan olette asuneet nykyisessä asunnossanne?

_____ vuotta

Vakinaisesti asunnossa asuvien aikuisten lukumäärä

- yksi.....
- kaksi.....
- kolme
- neljä
- enemmän, monta?.....

Lapset

ikä _____

ikä _____

ikä _____

ikä _____

ikä _____

Lemmikkieläimet (koirat ja kissat)

Koirien lukumäärä _____

Kissojen lukumäärä _____

RAKENNUKSET PERUSTIEDOT

Rakentamisvuosi (valmistumisvuosi)

Asuinkerrosten lukumäärä

- 1
- 1 ½
- 2
- 3

Onko rakennuksessa kellaria?

- 1 kyllä
- 2 ei

Rakennustapa

talun runkomateriaalin valmistaja/toimittaja:

- 1 rungon pystytys itse
- 2 rungon pystytti materiaalitoimittaja
- 3 rungon pystytti muu urakoitsija

Vesikaton malli

- 1 harjakatto
- 2 tasakatto
- 3 aumakatto
- 4 pulpettikatto.....

Asuintiloissa tapahtuneet kosteusvauriot

- putkivuoto.....
- kattovuoto.....
- maaperästä nouseva kosteus
- vuoto ulkoseinien kautta
- märkätilojen vesieristevuoto.....
- jokin muu, mikä?

Rakennuksen peruskorjaukset ja laajennukset (rakennus- ja lvi-tekniikka)

Vuosi / tehty korjaus tai laajennus

LÄMMITYS JA ILMANVAIHTO**Asumuksen lämmitysmuoto**

- 1 suora sähkö
- 2 varaava sähkö
- 3 öljy
- 4 puu
- 5 maalämpöpumppu
- 6 muu, mikä

Arvioitu energiankulutus vuodelta 2005

kWh sähköä / vuosi.....

litraa öljyä / vuosi

m3 puuta / vuosi

Arvioitu vedenkulutus vuodelta 2005

m3 vettä / vuosi.....

Asumuksen lämmönjakojärjestelmä

Alleiviivaa lisäksi pääasiallisin lämmönjakojärjestelmä ja ympyröi vanhempien makuuhuoneen/päämakuuhuoneen lämmönjakojärjestelmä, jos asunnossanne monta lämmönjakojärjestelmää

- 1 vesikeskuslämmitys
- patterit.....
- lattialämmitys.....
- 2 sähkölämmitys
- patterit.....
- massavaraajat
- lattialämmitys.....
- kattolämmitys.....
- 3 ilmalämmitys
- 4 muu, mikä

Ikkunoiden suuntaus vanhempien makuuhuoneessa/päämakuuhuoneessa

- 1 pohjoinen
- 2 koillinen
- 3 itä
- 4 kaakko.....
- 5 etelä
- 6 lounas
- 7 länsi.....
- 8 luode

Asumuksen ilmanvaihtojärjestelmä

- 1 painovoimainen (ei mitään puhaltimia)
- 2 painovoimainen + liesituuletin.....
- 3 koneellinen poistoilmanvaihto.....
- Onko asunnossa korvausilmaventtiilit?
- ei ole
- ikkunoissa
- ulkoseinillä
- raitisilmaradiaattorit.....
- 4 koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto.....
- tavanomainen
- (käsisäätö)
- hiilidioksidi ja / tai
- kosteusohjaus.....

Ilmanvaihtolaite

merkki ja malli

käyttöasento

kesä _____

talvi _____

perustelut käyttöasennoille

suodattimien vaihtoväli

Onko asunnossa jäähdytystä? (asuntoa voidaan jäähdyttää keväällä ja kesällä)

- 1 ei ole
- 2 kyllä.....

Tulisijat ja niiden käyttö (keskimäärin)

- puukiuas
käyttö kertaa / kuukausi _____
- takka
käyttö kertaa / kuukausi _____
- leivinuuni
käyttö kertaa / kuukausi _____
- puuliesi
käyttö kertaa / kuukausi _____

IKKUNATUULETUS**Kuinka usein tuuletatte asuntonne perusteellisesti ikkunoiden ja / tai ulko-oven/parvekkeen oven kautta?**

- 1 harvemmin kuin kerran viikossa
- 2 noin 1-3 kertaa viikossa
- 3 lähes päivittäin
- 4 useammin kuin 2 kertaa päivässä

Kuinka kauan tuuletatte kerrallaan?

- 1 alle 2 minuuttia
- 2 noin 2-10 minuuttia
- 3 noin 10-30 minuuttia
- 4 yli 30 minuuttia

Mitkä ovat tärkeimmät syyt ikkunoiden tai ovien avaamisen avulla tapahtuvaan tuuletukseen?

Aseta syyt numerojärjestykseen, tärkein syy = 1, seuraavaksi tärkein = 2, jne.

Merkitse makuuhuoneen ovien aukipitämisen tärkein syy/syyt rastilla (x)

- Ruuan käry
- Tupakointi
- Siivous
- Tunkkaisuus
- Kuumuus
- Ahdistava olo, "ilma loppuu"
- Muu syy?

Makuuhuoneiden ikkunoiden aukipitäminen raollaan yöaikaan?

Vanhempien makuuhuone

- 1 ei
- 2 vain kesällä
- 3 ympäri vuoden

Lastenhuoneet

- 1 ei
- 2 vain kesällä
- 3 ympäri vuoden

Makuuhuoneiden oven aukipitäminen yöaikaan?

Vanhempien makuuhuone

- 1 yleensä auki
- 2 yleensä kiinni
- 3 ei ovea

Lastenhuoneet

- 1 yleensä auki
- 2 yleensä kiinni
- 3 ei ovea

KOSTEUSLÄHTEET**Asukkaiden tavanomainen paikallaolo**

Talvella

- 1 päivisin _____ henkilöä
- 2 iltaisin ja öisin _____ henkilöä

Kesällä

- 1 päivisin _____ henkilöä
- 2 iltaisin ja öisin _____ henkilöä

Onko taloudessa ilmastuttimen käyttö?

- 1 ei
- 2 kyllä, makuuhuoneessa
- 3 kyllä, olohuoneessa

Ilmankostuttimen käyttö

- jatkuvasti _____ kuun ja _____ kuun välisenä aikana
- vain kovilla pakkasilla
- kostutin suljetaan töihin lähtiessä

Onko asunnossa muita kosteuslähteitä kuten akvaario?

- 1 Ei
- 2 Kyllä, mikä

Asunnossa olevien viherkasvien määrä

- 1 ei viherkasveja
- 2 kasveja on 1-5 kpl.....
- 3 kasveja on 5-10 kpl.....
- 4 kasveja on yli 10 kpl

Kuivaatteko pyykkiä asunnon sisätiloissa (kuivaustelineessä, narulla tms.)?

- 1 ei
- 2 kyllä, joskus
- 3 kyllä, säännöllisesti _____kerta / vko
- kylpyhuoneessa
- muualla, missä.....

Kuivuuko pyykki mielestänne

- 1 nopeasti
- 2 kohtalaisen nopeasti
- 3 hitaasti

Kuinka usein asuntonne suihkua tai kylpyammetta käytetään?

- 1 kerran viikossa tai harvemmin
- 2 pari kertaa viikossa
- 3 kerran päivässä
- 4 useamman kerran päivässä

Kuinka usein saunotte?

- 1 kerran viikossa tai harvemmin
- 2 pari kertaa viikossa
- 3 kerran päivässä

Onko asunnossanne kondenssikuivain pyykinkuivatusta varten?

- 1 ei
- 2 kyllä.....

Huurtuvatko asuntonne olo- tai makuuhuoneen ikkunat talvella?

- 1 ei
- 2 kyllä, sisäikkunan sisäpinta.....
- 3 kyllä, ulkoikkunan sisäpinta

SISÄILMASTO**Esiintyykö asunnossanne seuraavanlaisia sisäilmasto-ongelmia?**

	kyllä	ei
Vaihteleva huonelämpötila	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lattioiden kylmyys	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kosteaa ilma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tunkkainen (huono) ilma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Riittämätön ilmanvaihto talvella	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Riittämätön ilmanvaihto kesällä	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Havaittava pöly tai lika pinnoilla	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Melu ilmanvaihtolaitteista	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Heikko valaistus tai häikäisy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pinnoilta tulevat sähköiskut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jokin muu, mikä?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys asunnossaLiian lämmin

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan.....

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- aamupäivällä
- iltapäivällä
- illalla
- ei eroa

- syksyllä
- talvella
- kevällä
- kesällä
- ei eroa

Liian kylmä

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- aamupäivällä
- iltapäivällä
- illalla
- ei eroa

- syksyllä
- talvella
- keväällä
- kesällä
- ei eroa

Veto

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- aamupäivällä
- iltapäivällä
- illalla
- ei eroa

- syksyllä
- talvella
- keväällä
- kesällä
- ei eroa

Liian kuiva ilma

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- talvella
- keväällä
- ei eroa

Pölyinen ilma

- lähes päivittäin
- 1-3 päivänä viikossa
- 1-3 päivänä kuukaudessa
- harvemmin
- ei koskaan

Milloin ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- syksyllä
- talvella
- keväällä
- kesällä
- ei eroa

Epämiellyttävä haju

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

- aamupäivällä
- iltapäivällä
- illalla
- ei eroa

- syksyllä
- talvella
- keväällä
- kesällä
- ei eroa

Missä asuntonne tiloissa tai kohdissa ongelmat esiintyvät?(kuvailekaa mahdollisimman tarkasti)

Mistä ongelmat mielestänne johtuvat?

Keskittyvätkö ongelmat tiettyihin olosuhteisiin tai tiettyyn vuorokauden tai vuodenaikaan?

RAKENNUSTEKNIikka

Rakennuksen pääasiallinen ikkunatyyppi

- 1 kaksilasinen MS
- 2 kolmilasinen MSK
- 3 lasi + lämpölasit MSE
- 4 lasi + lämpölasit + selektiivikalvo MSEs
- 5 lämpölasit EK
- 6 lämpölasit + selektiivikalvo EKs
- 7 jokin muu, mikä?
-

Rakennuksen ulkoseinä / rakennekerrokset

Kantava rakenne

Hirren/harkon/tiilen/betonielementin paksuus (mm): _____

- 1 hirsi
- 2 kevytbetoniharkko
- 3 kevytsoraharkko
- 4 kalkkihiekkatiili
- 5 poltettu tiili
- 6 betonielementti
- 7 betoniharkko

Kysymykset a) – b) on tarkoitettu hirsitaloille

a) Hirsiprofiili

- 1 pyöröhirsi
- 2 lamellipyöröhirsi
- 3 höylähirsi
- 4 lamellihöylähirsi

b) Saumaeriste

Seinän nurkissa

- 1 polypropeeni
- 2 pellava
- 3 solukuminauha
- 4 polyuretaanivaaho
- 5 jokin muu, mikä?
-

Seinällä

- 1 polypropeeni
- 2 pellava
- 3 solukuminauha
- 4 polyuretaanivaaho
- 5 jokin muu, mikä?
-

Jos hirsitalossasi on lisälämmöneristys, vastaa myös tiilitaloille tarkoitettuihin kysymyksiin d) - i).

Kysymys c) on tarkoitettu eristeharkkotaloille ja betonielementtitaloille

c) Lämmöneriste harkon tai elementin sisällä

- Eristepaksuus (mm) _____
- 1 polyuretaanieriste
- 2 polystyreeni ("styrox")
- 3 puhallettava mineraalivilla
- 4 levymäinen mineraalivilla
- 5 puhallettava puukuitueriste
- 6 levymäinen puukuitueriste
- 7 jokin muu, mikä?
-

Kysymykset d)–i) on tarkoitettu tiilitaloille

d) Ulkoverhous

- 1 puu
- 2 moduulitiili (leveys 85 mm)
- 3 täystiili (leveys 130 mm)
- 4 jokin muu, mikä?
-

e) Tuuletusrako

- 1 on
- 2 ei ole

f) Tuulensuoja

- 1 kipsilevy
 - 2 ohut huokoinen kuitulevy (<20 mm)
 - 3 paksu huokoinen kuitulevy (>20 mm)....
 - 4 mineraalivillalevy
 - 5 tuulensuojakalvo
 - 6 jokin muu, mikä?.....
-

g) Lämmöneriste

Eristepaksuus (mm) _____

- 1 polyuretaanieriste
 - 2 polystyreeni ("styrox").....
 - 3 puhallettava mineraalivilla
 - 4 levymäinen mineraalivilla
 - 5 puhallettava puukuitueriste.....
 - 6 levymäinen puukuitueriste
 - 7 jokin muu, mikä?.....
-

h) Höyryn- ja/tai ilmansulku

- 1 muovi
 - 2 muovitettu paperi
 - 3 bitumipaperi
 - 4 rakennuspaperi.....
 - 5 ei höyryn- ja/tai ilmansulkua
 - 6 jokin muu, mikä?.....
-

i) Ilmansulun tiivistys

- 1 teipatut limisaumat.....
- 2 ei teipattu

Rakennuksen yläpohja / rakennekerrokset

- 1 betonirakenteinen
- 2 kevytbetonirakenteinen.....
- 3 puurakenteinen

Kysymykset j) – m) on tarkoitettu taloille, joissa on puurakenteinen yläpohja

j) Yläpohjan tuulensuoja

- 1 kipsilevy
 - 2 ohut huokoinen kuitulevy (<20 mm).....
 - 3 paksu huokoinen kuitulevy (>20 mm)....
 - 4 mineraalivillalevy.....
 - 5 tuulensuojakalvo
 - 6 jokin muu, mikä?
-

k) Yläpohjan lämmöneriste

Eristepaksuus (mm) _____

- 1 polyuretaanieriste
 - 2 polystyreeni ("styrox")
 - 3 puhallettava mineraalivilla.....
 - 4 levymäinen mineraalivilla
 - 5 puhallettava puukuitueriste
 - 6 levymäinen puukuitueriste
 - 7 jokin muu, mikä?
-

l) Yläpohjan höyryn- ja/tai ilmansulku

- 1 muovi
 - 2 muovitettu paperi
 - 3 bitumipaperi
 - 4 rakennuspaperi
 - 5 ei höyryn- ja/tai ilmansulkua
 - 6 jokin muu, mikä?
-

m) Yläpohjan ilmansulun tiivistys

- 1 teipatut limisaumat.....
- 2 ei teipattu

Rakennuksen alapohja

- 1 maanvarainen
- 2 tuuletettu
- betonirakenteinen
- kevytbetonirakenteinen
- puurakenteinen

Kysymykset n) –r) on tarkoitettu tuuletetuille alapohjille

n) Alapohjan lämmöneriste

Eristepaksuus (mm) _____

- 1 polyuretaanieriste
- 2 polystyreeni ("styrox")
- 3 puhallettava mineraalivilla
- 4 levymäinen mineraalivilla
- 5 puhallettava puukuitueriste
- 6 levymäinen puukuitueriste
- 7 jokin muu, mikä?
- _____

o) Kivirakenteisen tuuletetun alapohjan lämmöneristeen sijainti

- 1 laatan yläpuolella
- 2 laatan alapuolella

p) Tuuletetun puurakenteisen alapohjan tuulensuoja

- 1 kipsilevy
- 2 ohut huokoinen kuitulevy (<20 mm)
- 3 paksu huokoinen kuitulevy (>20 mm)....
- 4 mineraalivillalevy
- 5 tuulensuojakalvo
- 6 jokin muu, mikä?
- _____

q) Tuuletetun puurakenteisen alapohjan höyrynsuoja/tai ilmansulku

- 1 muovi
- 2 muovitettu paperi
- 3 bitumipaperi
- 4 rakennuspaperi
- 5 ei höyrynsuoja- ja/tai ilmansulkua
- 6 jokin muu, mikä?
- _____

r) Alapohjan maanpinta

- 1 lämmöneriste
- 2 kevytsora
- 3 sepeli- / sorapinta
- 4 jokin muu, mikä?
- _____

Tämän lomakkeen kysymykset koskevat rakennuksen sisäilmastoa, teknisiä järjestelmiä sekä energian ja veden kulutustietoja.

Ne kysymykset, joihin ette tiedä vastausta tai ette osaa vastata, voitte jättää väliin.

ASUKASTIEDOT

Kuinka kauan olette asuneet nykyisessä asunnossanne?

_____ vuotta

Vakinaisesti asunnossa asuvien aikuisten lukumäärä

yksi
 kaksi
 kolme
 neljä
 enemmän, montako?

Lapset

ikä _____
 ikä _____
 ikä _____
 ikä _____
 ikä _____

Lemmikkieläimet (koirat ja kissat)

Koirien lukumäärä _____
 Kissojen lukumäärä _____

IKKUNATUULETUS

Kuinka usein tuuletatte asuntonne perusteellisesti ikkunoiden ja / tai ulko-oven/parvekkeen oven kautta?

- 1 harvemmin kuin kerran viikossa
- 2 noin 1-3 kertaa viikossa
- 3 lähes päivittäin
- 4 useammin kuin 2 kertaa päivässä

Kuinka kauan tuuletatte kerrallaan?

- 1 alle 2 minuuttia
- 2 noin 2-10 minuuttia
- 3 noin 10-30 minuuttia
- 4 yli 30 minuuttia

Mitkä ovat tärkeimmät syyt ikkunoiden tai ovien avaamisen avulla tapahtuvaan tuuletukseen?

Aseta syyt numerojärjestykseen, tärkein syy = 1, seuraavaksi tärkein = 2, jne.

Merkitse makuuhuoneen ovien aukipitämisen tärkein syy/syyt rastilla (x).

Ruuan käry.....
 Tupakointi
 Siivous
 Tunkkaisuus.....
 Kuumuus.....
 Ahdistava olo, "ilma loppuu"
 Muu syy?.....

Makuuhuoneiden *ikkunoiden* aukipitäminen raollaan yöaikaan?

Vanhempien makuuhuone

- 1 ei
- 2 vain kesällä
- 3 ympäri vuoden

Lastenhuoneet

- 1 ei
- 2 vain kesällä
- 3 ympäri vuoden

**Makuuhuoneiden ovien aukipitäminen yöai-
kaan?***Vanhempien makuuhuone*

- 1 yleensä auki
- 2 yleensä kiinni

Lastenhuoneet

- 1 yleensä auki
- 2 yleensä kiinni

KOSTEUSLÄHTEET**Asukkaiden tavanomainen paikallaolo***Talvella*

- 1 päivisin _____ henkilöä
- 2 iltaisin ja öisin _____ henkilöä

Kesällä

- 1 päivisin _____ henkilöä
- 2 iltaisin ja öisin _____ henkilöä

Onko taloudessa ilmankostutin?

- 1 ei
- 2 kyllä, makuuhuoneessa
- 3 kyllä, olohuoneessa

Ilmankostuttimen käyttö

jatkuvasti _____ kuun ja
_____ kuun välisenä aikana

vain kovilla pakkasilla

kostutin suljetaan töihin lähtiessä

**Onko asunnossa muita kosteuslähteitä kuten
akvaario?**

- 1 Ei
- 2 Kyllä, mikä

Asunnossa olevien viherkasvien määrä

- 1 ei viherkasveja
- 2 kasveja on 1-5 kpl
- 3 kasveja on 5-10 kpl
- 4 kasveja on yli 10 kpl

**Kuivaatteko pyykkiä asunnon sisätiloissa (kui-
vaustelineessä, narulla tms.)?**

- 1 ei
- 2 kyllä, joskus
- 3 kyllä, säännöllisesti _____ kertaa / vko
- kylpyhuoneessa
- saunassa
- muualla, missä

Kuivuuko pyykki mielestänne

- 1 nopeasti
- 2 kohtalaisen nopeasti
- 3 hitaasti

**Kuinka usein asuntonne suihkua tai kylpyam-
metta käytetään?**

- 1 kerran viikossa tai harvemmin
- 2 pari kertaa viikossa
- 3 kerran päivässä
- 4 useamman kerran päivässä

Kuinka usein saunotte(sauna asunnossa)?

- 1 kerran viikossa tai harvemmin
- 2 pari kertaa viikossa
- 3 kerran päivässä

**Onko asunnossanne kondenssikuivain pyykin-
kuivatusta varten?**

- 1 ei
- 2 kyllä

**Huurtuvatko asuntonne olo- tai makuuhuo-
neen ikkunat talvella?**

- 1 ei
- 2 kyllä, sisäikkunan sisäpinta
- 3 kyllä, ulkoikkunan sisäpinta

SISÄILMASTO**Esiintyykö asunnossanne seuraavanlaisia sisäilmasto-ongelmia?**

kyllä ei

Vaihteleva huonelämpötila

Lattioiden kylmyys

Kosteaa ilmaa

Tunkkainen (huono) ilma

Riittämätön ilmanvaihto talvella

Riittämätön ilmanvaihto kesällä

Havaittava pöly tai lika pinnoilla

Melu ilmanvaihtolaitteista

Heikko valaistus tai häikäisy

Pinnoilta tulevat sähköiskut

Jokin muu, mikä?

Sisäilmasto-ongelmien esiintyvyys asunnossaLiian lämmin

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa.....
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

aamupäivällä

iltapäivällä

illalla

ei eroa

syksyllä.....

talvella

keväällä

kesällä

ei eroa

Liian kylmä

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa.....
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

aamupäivällä

iltapäivällä

illalla

ei eroa

syksyllä

talvella

keväällä

kesällä

ei eroa

Veto

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan.....

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

aamupäivällä

iltapäivällä

illalla

ei eroa

syksyllä

talvella

keväällä

kesällä

ei eroa

Liian kuiva ilma

- 1 lähes päivittäin
- 2 noin 1-3 päivänä viikossa
- 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
- 4 harvemmin
- 5 ei koskaan.....

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

syksyllä

talvella

keväällä

keväällä

ei eroa

Pölyinen ilma

lähes päivittäin
 1-3 päivänä viikossa
 1-3 päivänä kuukaudessa
 harvemmin
 ei koskaan

Milloin ongelma esiintyy voimakkaimmin?

syksyllä.....
 talvella
 keväällä
 kesällä
 ei eroa

Epämiellyttävä haju

1 lähes päivittäin
 2 noin 1-3 päivänä viikossa.....
 3 noin 1-3 päivänä kuukaudessa
 4 harvemmin
 5 ei koskaan

Milloin tämä ongelma esiintyy voimakkaimmin?

aamupäivällä
 iltapäivällä
 illalla
 ei eroa

syksyllä.....
 talvella
 keväällä
 kesällä
 ei eroa

Missä asuntonne tiloissa tai kohdissa ongelmat esiintyvät?(kuvailekaa mahdollisimman tarkasti)

.....

Mistä ongelmat mielestänne johtuvat?

.....

.....

 Keskittyvätkö ongelmat tiettyihin olosuhteisiin tai tiettyyn vuorokauden tai vuodenaikaan?

VIIHTYISYYS

Miten kuvailisit tyypillisiä sisäilmaolosuhteita asunnossasi **TALVELLA**? (*rastita yksi vaihtoehto kultakin riviltä*)

Lämpötila talvella

Miellyttävä Epämiellyttävä

Liian kuuma Liian kylmä

Tasainen Vaihtelee päivän aikana

Ilman liike talvella

Liian seisova Liian liikkuva

Ilman laatu talvella

Kuiva Kostea

Raikas Tunkkainen

Hajuton Pahanhajuinen

Miellyttävä Epämiellyttävä

LVI-järjestelmistä johtuva melu (esim. lämmitys, putkistot, ilmanvaihto, ilmastointi) talvella

Hyväksyttävä Ei hyväksyttävä

Viihtyisyys yleisesti ottaen talvella

Yleisesti ottaen 1 2 3 4 5 6 7 Yleisesti ottaen
 □□□□□□□□ □□□□□□□□
 tyytyväinen tyytymätön

Tuleeko **TALVELLA** epämiellyttäviä hajuja jostakin seuraavista lähteistä (*rastita kaikki sopivat*)

- Sisustuksesta, kalusteista
- Ruuasta
- Tupakasta
- Keittiöstä
- Rapukäytävästä tai porrastasanteelta
- WC:stä tai viemäristä
- Ulkoa
- Muista asunnoista (*mitä hajua ja mistä, kirj. alla olevaan laatikkoon*)

Häiritseekö sinua **TALVELLA** veto, jonka aiheuttaa jokin seuraavista (*rastita kaikki sopivat*)

- Koneellinen ilmanvaihto
- Ulko-ovet
(*myös ovet parvekkeelle*)
- Väliovien oviraot
- Korvausilmaventtiilit
- Jokin muu
(*mikä, kirjoita laatikkoon*)

Miten kuvailisit tyypillisiä sisäilmaolosuhteita asunnossasi **KESÄLLÄ**? (*Rastita yksi vaihtoehto kullakin riviltä*)

Lämpötila kesällä

Miellyttävä 1 2 3 4 5 6 7 epämiellyttävä
 □□□□□□□□ □□□□□□□□
 Liian kuuma..... □□□□□□□□..... Liian kylmä

1 2 3 4 5 6 7

Tasainen □□□□□□□□..... Vaihtelee päivän aikana

Ilman liike kesällä

1 2 3 4 5 6 7

Liian seisova..... □□□□□□□□..... Liian vetoisa

Ilman laatu kesällä

1 2 3 4 5 6 7

Kuiva □□□□□□□□..... Kostea

1 2 3 4 5 6 7

Raikas □□□□□□□□..... Tunkkainen

1 2 3 4 5 6 7

Hajuton □□□□□□□□..... Pahanhajuinen

1 2 3 4 5 6 7

Tasainen □□□□□□□□..... Vaihtelee päivän aikana

LVI-järjestelmistä johtuva melu (esim. lämmitys, putkistot, ilmanvaihto, ilmastointi) kesällä

1 2 3 4 5 6 7

Hyväksyttävä □□□□□□□□ Ei hyväksyttävä

Viihtyisyys yleisesti ottaen kesällä

Yleisesti ottaen 1 2 3 4 5 6 7 Yleisesti ottaen
 □□□□□□□□ □□□□□□□□
 tyytyväinen tyytymätön

Tuleeko **KESÄLLÄ** epämiellyttäviä hajuja jostain seuraavista lähteistä?

- Sisustuksesta, kalusteista
- Ruuasta
- Tupakasta
- Keittiöstä
- Rapukäytävästä tai porrastasanteelta
- WC:stä tai viemäristä
- Ulkoa
- Muista asunnoista (*mitä hajua ja mistä, kirj. alla olevaan laatikkoon*)

LÄMMITYS JA ILMANVAIHTO

Mitä mieltä olet asuntosi lämmityksestä yleisellä tasolla?

Tyytyväinen 1 2 3 4 5 6 7 Tyytymätön

Koetko minkään seuraavista ongelmaksi asuntosi lämmityksessä (*rastita kaikki sopivat*)

- Tarvitaan lisälämmitystä
- Lämmityspatterit eivät lämpene tasaisesti
- Lämmityspatterin pinta on lämmin, ei kuuma
- Lämpötila vaihtelee huoneesta toiseen
- Lämmitystä ei voi säädellä ajastimella
- Lämpötilan säätömahdollisuudet ovat riittämättömät
- Viallinen termostaatti
- Asuntoon tarvitaan lisäeristystä
- Vetoisuus

TERVEYSTIEDOT

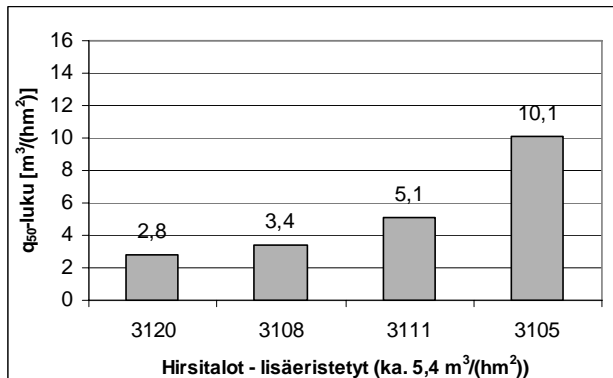
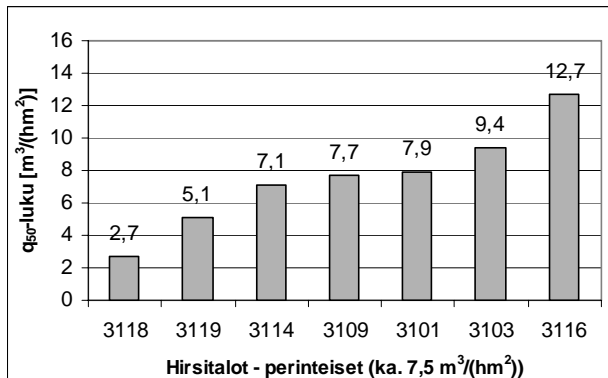
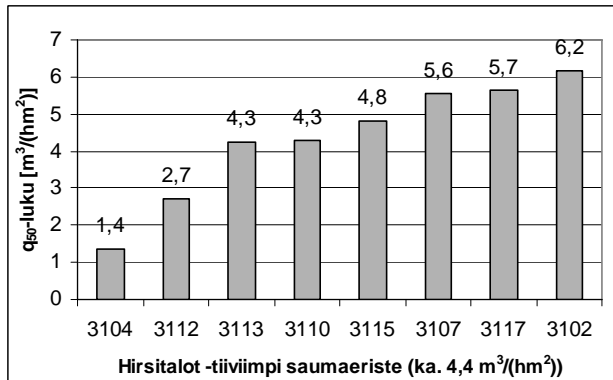
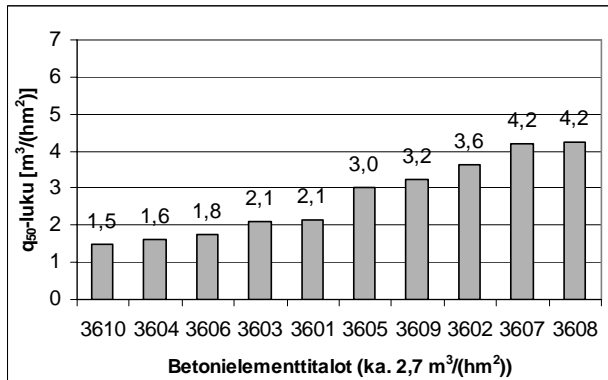
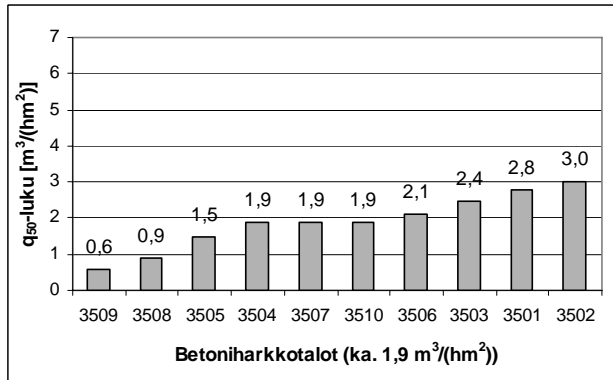
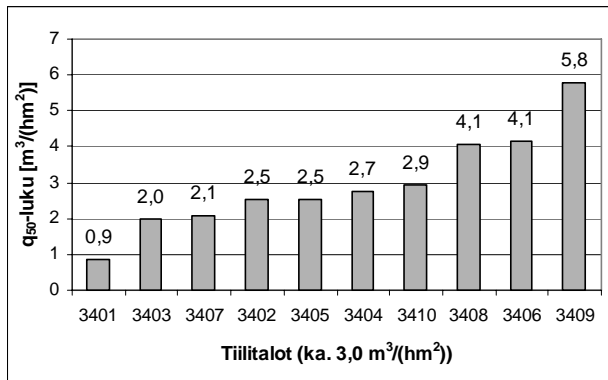
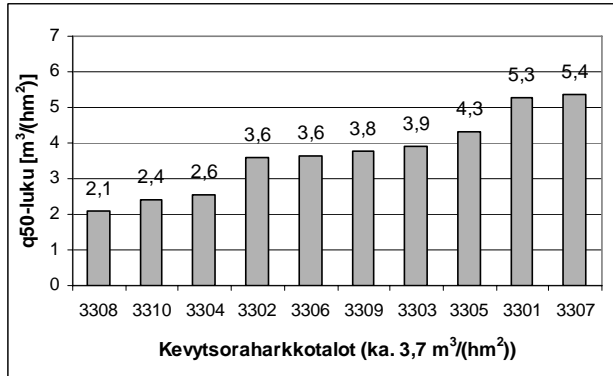
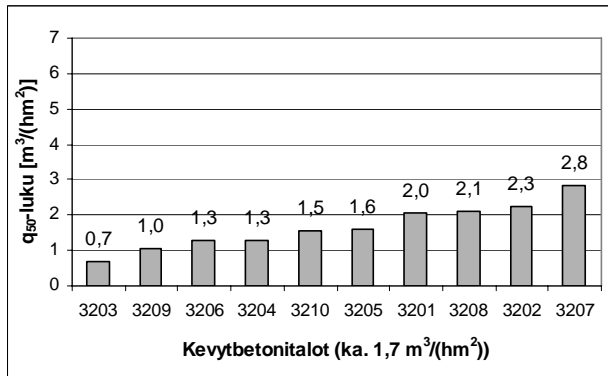
Miten arvioit tämän asunnon vaikuttavan terveyteesi?

Edistää 1 2 3 4 5 6 7 Aiheuttaa
 Terveyttä terveyshaittaa

Miten arvioit tämän asunnon sisäilman vaikuttavan kykyysi työskennellä kotona ja toimittaa askareita? (Esim. etätyö, vaadittavat paperityöt, taloustyöt)

Auttaa selvästi 1 2 3 4 5 6 7 Haittaa selvästi

Pientalo-kohteiden q_{50} -luvut taloryhmittäin. Nelinumeroinen luku on talon koodi. Huomaa eri mitta-asteikko kahdessa alimman rivin kuvassa





- 123 Mattila, J., Pentti, M., Suojaustoimien tehokkuus suomalaisissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. TTY 2004. 69 s. 42 €.
- 122 Leivo, V., Rantala, J., Moisture Behavior of Slab-on-Ground Structures. TUT 2003. 100 p. + 12 app. 34 €.
- 121 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. TTKK 2002. 33 s. + 11 liites.
- 120 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. TTKK 2003. 106 s. + 13 liites. 34 €.
- 119 Lindberg, R., Wahlman, J., Suonketo, J., Paukku, E., Kosteusvirtatutkimus. TTKK 2002. 92 s. + 3 liites. 34 €.
- 118 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen, osa II. TTY 2003. 58 s. + 12 liites. 30 €.
- 117 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Comparison of the Moisture Behaviour of Timber-Framed Wall Structures in a One-Family House. 34 € (julkaistaan lähiaikoina)
- 116 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa. TTKK 2002. 54 s. + 11 liites. 34 €.
- 115 Junttila, T., Venäjän rakennusalan säädöstö ja viranomaishallinto, osa I ja II TTKK 2001. 97 s. 34 €
- 114 Junttila, T., (toim.) Venäjän rakennusalan tuotekortit. TTKK 2001. 63 s. 34 €
- 113 Junttila, T., Lod, T., Aro, J., Rakennusinvestointihankkeen toteuttaminen Moskovassa. TTKK 2001. 112 s. + 11 liites. 34 €
- 112 Junttila, T., (toim.), Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa B: Talonrakennustekniikka. TTKK 2001. 174 s. 34 €
- 111 Junttila, T., (toim.) Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa A: Liiketoimintaympäristö ja rakennushankkeen johtaminen. TTKK 2001. 173 s. + 21 liites. 34 €
- 110 Юнттила, Т. (под ред.), Управление недвижимостью в России. Теория и практические примеры. Технический университет Тампере 2001. 356 стр. + приложения на 33 стр. 34 €
- 109 Junttila, T., (toim.) Kiinteistöjohtaminen Suomessa ja Venäjällä. Edellytykset kiinteistöalan yhteistyölle. TTKK 2001. 293 s. + 54 liites. 34 €
- 108 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen. TTKK 2001. 80 s. + 7 liites. 34 €
- 107 Binamu, A., Lindberg, R., The Impact of Air Tightness of The Building Envelope on The Efficiency of Ventilation Systems with Heat Recovery. TTKK 2001. 62 p. + 7 app., 25 €
- 106 Leivo, V., Rantala, J., Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK 2000. 124 s. 34 €
- 105 Junttila, T. (toim.), Venäjän federaation kaavoitus- ja rakennuslaki. TTKK 2000. 49 s. 34 €
- 104 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures. TUT 2000. 46 p. + 9 app. 25 €
- 103 Vinha, J., Käkelä, P., Water Vapour Transmission in Wall Structures Due to Diffusion and Convection. TUT 1999. 110 s. 34 €
- 102 Suonketo, J., Pessi, A-M., Pentti, M.,
- 101 Pessi, A-M., Suonketo, J., Pentti, M., Raunio-Lehtimäki, A. Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus. TTKK. 1999. 88 s. + 6 liites. 42 €
- 100 Pentti, M., Haukijärvi, M., Betonijulkisivujen saumausten suunnittelu ja laadunvarmistus. TTKK 2000. 2. täydennetty painos. 78 s. + 3 liites. 42 €
- 99 Torikka, K., Hyypöläinen, T., Mattila, J., Lindberg, R., Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus. TTKK 1999. 106 s. + 37 liites. 34 €
- 98 Mattila, J., Peuhkurinen, T., Lähiökerrostalon lisärakentamishankkeen tekninen esiselvitysmenettely. Korjaus- ja LVIS-tekninen osuus. TTKK 1999. 48 s.
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkerrostaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 34 €



- 96 Vinha, J., Käckelä, P., Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. TTKK 2001. 3 painos. 81 s. + 29 liites. 34 €
- 95 Leivo, V. (toim.), Opas kosteusongelmiin – rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. TTKK 1998. 157 s. 25 €
- 94 Pentti, M., Hyypöläinen, T., Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK 1999. 150 s. + 40 liites. 42 €
- 93 Lepo, K., Laatu järjestelmän kelpoisuus. TTKK 1998. 101 s. + 50 liites.
- 92 Berg, Malinen, P., Leivo, V., Internal Monitoring of The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries – Rapid Programme. TUT 1998. 81 s. + 93 liites.
- 91 Berg, P., Salminen, K., Leivo, V., Nopeat tuotantojärjestelmät teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1998-2000 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1998. 55 s. + 37 liites.
- 90 Lindberg, R., Keränen, H., Teikari, M., Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. TTKK 1998. 34 s. + 26 liites.
- 89 Pentti, M., Huttunen, I., Vepsäläinen, K., Olenius, K., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa III Korjaushanke. TTKK 1998. 124 s. + 23 liites. 42 €

Tutkimusraportin hinta:**20 €, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnanmuutoksiin pidätetään.****Hintoihin lisätään alv 8 %.****Myynti:****Juvenes-Yhtiöt Oy, Tampereen teknillisen yliopiston kirjakauppa, Rakennustalo****Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere****Puh.(03) 3115 2351, faksi (03) 3115 2191, TTY.kirjakauppa@juvenes.fi****tai Tampereen teknillinen yliopisto, Terttu Mäkipää puh. (03) 3115 4804,****terttu.makipaa@tut.fi**

Tampereen teknillinen yliopisto
Rakennustekniikan laitos
Rakennetekniikka
PL 600
33101 Tampere

Tampere University of Technology
Department of Civil Engineering
Structural Engineering
P.O.B. 600
FI-33101 Tampere, Finland

ISBN 978-952-15-2105-8
ISSN 1797-9161