



Jonne Erkkilä

ILMATIIVEYS 1980- JA 1990-LUVULLA RAKENNETUISSA PIEN- TALOISSA

ILMATIIVEYS 1980- JA 1990-LUVULLA RAKENNETUISSA PIEN- TALOISSA

Jonne Erkkilä
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakennus

Tekijä: Jonne Erkkilä

Opinnäytetyön nimi: Ilmatiiveys 1980- ja 1990-luvuilla rakennetuissa pientaloissa

Työn ohjaajat: Kimmo Illikainen, Kauko Tulla

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2013

Sivumäärä: 53 + 1 liitettä

Ilmatiiveys kuvaa rakenteen kykyä vastustaa ilman liikettä rakenteen läpi. Rakennuksen vaipan hyvä ilmatiiveys estää haitallisen ilmavirtauksen rakenteiden läpi ja pienentää rakennuksen lämmitysenergian kulutusta. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä 1980- ja 1990-luvuilla rakennettujen pientalojen ilmatiiveyteen tiiveysmittausten eli painekokeiden avulla ja kerätä tutkimustuloksia Oulun seudun ammattikorkeakoulun IEEB-projektia varten. Painekokeiden yhteydessä suoritettiin lämpökuvaus, jolla paikannettiin mahdolliset ilmanvuotokohtat rakennusten vaipparakenteissa.

Opinnäytetyössä tehtiin yhteensä 11 painekoetta ja lämpökuvausta Oulun alueella sijaitseviin pientaloihin. Painekokeet suoritettiin standardin SFS-EN 13829 menetelmän B mukaan. Painekokeissa käytettiin Minneapoliksen valmistamaa tiiveysmittauslaitteistoa ja lämpökuvauksissa FLIR B400 Weterin -lämpökameraa. Tiiveysmittausten tekoon ja raportointiin käytettiin laitevalmistajan tietokoneohjelmaa. Lämpökuvausraportit luotiin FLIR Reporter -ohjelman avulla. Kaikki tulokset myös dokumentoitiin IEEB-projektille luotuun tietokantaan tulosten vertailua varten.

Kaikkien mitattujen yhdentoista pientalon ilmanvuotoluvut mahtuivat vaihteluvälille 0,5 - 7,5 (1/h) n_{50} -luvulla ja 0,6 - 6,6 [$m^3/(m^2 \cdot h)$] q_{50} -luvulla. Keskiarvoksi n_{50} -luvulla saatiin 3,5 (1/h) ja q_{50} -luvulla 3,2 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. Tampereella 2009 toteutetussa tutkimuksessa vastaavat arvot tutkituilla pientaloilla olivat 3,9 (1/h) ja 3,9 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. Ilmanvuotokohtien paikannuksista tehtiin myös vertailutaulukko vuotokohtien paikkajakauman mukaan. Yleisin ilmanvuotokohta sijaitsi ulkoseinän ja yläpohjan liittymässä. Saadut mittaustulokset ja ilmanvuotokohtien paikkajakauma olivat samansuuntaisia aikaisemmin toteutettujen tutkimusten kanssa. Vertailua vaikeutti hieman ikäjakauma, koska opinnäytetyötä varten valitut kohteet mahtuivat 20 vuoden sisälle, kun taas aikaisemmin toteutetuissa tutkimuksissa kohteiden ikähaitari oli suurempi tai vertailtavat kohteet olivat iältään huomattavasti uudempia. Itse mittauksissa ei ongelmia juurikaan ilmennyt. Muutamissa kohteissa mittaushetkellä 5 m/s puhaltanut tuuli hieman vaikeutti luotettavien mittaustulosten saamista.

Asiasanat: ilmatiiveys, painekoe, lämpökuvaus, ilmanvuotoluku

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building Engineering

Author: Jonne Erkkilä

Title of thesis: Airtightness of houses from 1980s and 1990s

Supervisors: Kimmo Illikainen, Kauko Tulla

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2013

Pages: 53 + 1 appendices

Air Tightness describes the structure's ability to resist air movement through the structure. Good air tightness of the building envelope prevents harmful flow of air through the building and reduces the building's heating energy consumption. The aim of this thesis was to study the 1980s and 1990s built detached houses air tightness measurement by air-tightness tests and collect research to Oulu University of Applied science's IEEB-project. Air-tightness tests were carried out in connection with thermal imaging. Possible air-leaks in buildings shell structures were located with thermal imaging.

In this thesis was made a total of 11 air-tightness tests and thermal imaging of single family houses located in Oulu, Finland. The tests were made by standard SFS-EN 13829 with method B. In the measurement were used a Minneapolis Blowerdoor machine and thermography FLIR B400 Wetern-thermal camera. For making and reporting air-tightness measurement were used the manufacturer's software program. Thermal imaging reports were created in FLIR Reporter software. All results were also documented for IEEB-project with an existing database to compare the results.

Each measured single-family houses air leakage rates made it into the range of 0.5 - 7.5 (1/h) n_{50} 's and 0.6 - 6.6 [m³/(m²*h)]- q_{50} 's. n_{50} 's average figures were 3.5 (1/h) and q_{50} 's, 3.2 [m³/(m²*h)]. A study completed in 2009 in Tampere, the corresponding values for the studied single-family houses were 3.9 (1 / h), and 3.9 [m³ / (m² * h)]. The air leakage points of the readings were also carried out a comparative table of the leaks locations. The most common air leak was located in the exterior wall and roof junctions. The measurement results obtained with and without leaks allocation of seats were similar to earlier studies. Comparison difficult slightly by age. The items selected for this thesis made it into the 20-years interval, whereas in the past the studies performed subjects age difference was greater than or compare items were from much more recent. The measurements showed no problems. In a few places on the time of measurement 5 m / s wind blowing cause a little more difficult to obtain reliable measurements.

Keywords: air tightness, air-tightness test, thermal imaging, air leakage rate

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
MÄÄRITELMIÄ	7
1 JOHDANTO	8
2 ILMATIIVEYS	9
2.1 Konvektion aiheuttajat	9
2.1.1 Savupiippuvaikutus	10
2.1.2 Tuulen vaikutus paine-eroon	10
2.1.3 Ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttama paine-ero	11
2.2 Ilmavuotojen seuraukset	12
2.2.1 Ilmavuotojen vaikutus lämmitysenergiankulutukseen	12
2.3 Ilmavuodot osana uusia energiamääräykset	14
2.4 Tiiveysmittaus	16
2.4.1 Paineekoe	17
2.4.2 Tarvittavat laitteet	19
2.4.3 Virheeseen vaikuttavat asiat	22
2.4.4 Vuotokohtien paikantaminen	22
2.4.5 Raportointi	22
3 ILMATIIVEYDEN TOTEUTUS 1980- JA 1990-LUVUN RAKENTEISSA	24
3.1 Ilmatiiviiden rakenteiden toteutus	24
3.1.1 Ulkoseinät	25
3.1.2 Yläpohjat	26
3.1.3 Välipohja	27
3.1.4 Alapohjat	28
3.1.5 Ikkunoiden, ovien ja läpivientien ilmatiiviin liitoksen toteutus	31
4 TIIVEYSMITTAUKSET	33
4.1 Kohteiden esittely	35
4.2 Mittaustulokset	36
4.3 Vuotokohtien paikannus	39
4.3.1 Ulkoseinän ja yläpohjan liittymä	43

4.3.2 Ulkoseinän ja alapohjan liittymä	43
4.3.3 Ulkoseinien liittymä	44
4.3.4 Ulkoseinän ja välipohjan liittymä	45
4.3.5 Läpiviennit ja sähköasennukset	46
4.3.6 Ovet ja ikkunat	47
5 YHTEENVETO	49
LÄHTEET	52
LIITTEET	53

MÄÄRITELMIÄ

Ilmansulku on rakenteessa oleva ainekerros, joka estää haitallisen ilmavirtauksen rakennusosan puolelta toiselle (RT 80-10974. 2009).

Ilmatiiveys on rakennuksen vaipan kyky estää ilmavirtaus rakenteiden läpi (RT 80-10974. 2009).

Ilmanvuotoluku, n₅₀-luku kertoo, kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu rakennusvaipan vuotokohtien kautta tunnissa 50 pascalin paineerolla. Määritetään painekokeella. Yksikkönä 1/h. (SFS-EN 13829. 2000.)

Ilmanvuotoluku, q₅₀-luku ilmoittaa, kuinka monta kuutiota ilmaa vuotaa läpi tunnin aikana rakennusvaipan neliö kohden 50 pascalin paineerolla. Määritetään painekokeella. Yksikkönä m³/(h·m²). (SFS-EN 13829. 2000.)

Pientalo on yksi tai useampikerroksinen asuinrakennus, joka muodostuu yhdestä tai useammasta vierekkäin kiinni olevasta huoneistosta. Esimerkiksi Omakotitalot, kytketyt omakotitalot, paritalot ja rivitalot ovat pientaloja. (RT 80-10974. 2009.)

Rakennuksen vaippa muodostuu niistä rakennusosista, jotka erottavat rakennuksen sisäilman ulkoilmasta, maasta tai lämmittämättömästä tilasta. Näitä rakennusosia ovat ulkoseinät, ikkunat, ulko-ovet, alapohja sekä yläpohja. Rakennusvaippaan eivät kuulu rakennuksen sisällä olevat, lämpimiä tiloja toisistaan erottavat, rakenteet kuten väliseinät. (SFS-EN 13829. 2000.)

Tiiveysmittaus on toimenpide, jolla määritetään rakennuksen vaipan ilmatiiveys. Suoritetaan standardin EN 13829 mukaan. (RT 80-10974. 2009.)

Lämpökuvaus on toimenpide, jonka tarkoituksena on määrittää rakennuksen ulkovaipan lämpötekniinen kunto, lämmöneristyskerroksen toimivuus ja rakenteellinen ilmatiiveys. Lämpökameran avulla voidaan myös selvittää rakennuksen ja rakenteiden toimivuuteen sekä olosuhteisiin ja asumisviihtyvyyteen liittyviä tekijöitä, kuten ilman virtausreittejä ja kosteusvaurioita. (RT 14-10850. 2005.)

1 JOHDANTO

Rakennuksen vaipan hyvä ilmatiiveys estää haitallisen ilmavirtauksen rakenteiden läpi ja pienentää rakennuksen lämmitysenergian kulutusta. Suomessa on alettu 2000-luvulla kiinnittämän enemmän huomiota energiatehokkuuteen. Rakennuksen vaipan ilmatiiveys ja sen toteaminen ovat yksi osa rakennuksen energiatehokkuutta.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä 1980- ja 1990-luvuilla rakennettujen pientalojen ilmatiiveyteen tiiveysmittauksen eli painekokeen avulla. Painekokeen yhteydessä suoritetaan lämpökuvauksella lämpökameralla, jonka tavoitteena on paikallistaa vaipan mahdolliset ilmavuotokohtat.

Opinnäytetyössä kartoitetaan ilmanvuotoluvut ja ilmanvuotokohtien sijainnit kyseisen aikakauden pientaloille. Työssä esitellään myös 1980- ja 1990-luvulle tyypillisiä rakenneratkaisuja ja kerrotaan, kuinka ne voidaan toteuttaa ilmatiiviisti ja täten energiatehokkaasti. Lisäksi selvitetään, miten ilmatiiveys on huomioitu rakentamisessa.

Tiiveysmittaukset tehdään tutkimustyönä Oulun seudun ammattikorkeakoulun IEEB (Increasing Energy Efficiency in Buildings) -projektille. Mittaustulokset dokumentoidaan IEEB-projektille luotuun tietokantaan. Projektin tavoite on kehittää teknisesti energiaa säästäviä asuntoja sekä ehdottaa ratkaisuja olemassa olevien rakennusten energian kulutuksen ja energiasuorituskyvyn vaihtelujen vähentämiseksi saatujen mittaustulosten pohjalta.

2 ILMATIIVEYS

Ilma liikkuu rakenteissa paine- ja lämpötilaerojen vuoksi. Tästä ilman liikkeestä käytetään nimitystä konvektio. Ilmatiiveys kuvaa rakenteen kykyä vastustaa ilman liikettä rakenteen läpi. Rakenteen ilmatiiveydellä siis tarkoitetaan rakenteen hengittävyyttä tai epähengittävyyttä. (Paloniitty 2012, 12.)

Ilmatiiveyden mittaamisessa on tarkoituksena tutkia rakennuksen vaipan läpäisevää ilmavirtausta. Ilmaa voi virrata suoraan vaipan rakenteiden läpi tai vaipan rakojen ja reikien kautta. Tällaisia ilmanvuotokohtia voivat olla ilmanvaihdon läpiviennit, vaipan rakennusosien liitoskohdat sekä ikkunoiden, ovien ja hormien liitokset vaippaan. (Paloniitty 2012, 12.)

Vaipan ilmavuotokohtien paikallistaminen ja korjaaminen on sitä helpompaa, mitä suurempi vuotokohta on kyseessä. Pieniä reikiä ja repeämiä pidetään virheellisesti lähes mitättöminä ilmanvuotokohtina. Tämän takia pienempien vuotokohtien läpi kulkeutuvan ilman määrää on syytä tarkastella laskentakaavan avulla. Ilmavirtaus pienempien reikien kautta ohuessa rakenteessa lasketaan kaavalla 1 (Björkholtz 1987), jossa aikayksikkö on sekunti: (Paloniitty 2012, 13.)

$$Q = 0,8 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p}$$

KAAVA 1

A = reiän pinta-ala [m²]

M = voiman momentti [Nm]

$\sqrt{\Delta p}$ = neliöjuuri paine-erosta

2.1 Konvektion aiheuttajat

Konvektio voi olla joko luonnollista tai pakotettua. Ilman liike, joka tapahtuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista johtuen on luonnollista konvektiota. Kun ilma virtaa jonkin ulkopuolisen voiman tuottaman paine-eron vuoksi, kyseessä on pakotettu konvektio. Tällaista ilman liikettä voivat aiheuttaa esimerkiksi savupiippuvaikutus, tuuli ja ilmanvaihtojärjestelmä. (Paloniitty 2012, 13.)

2.1.1 Savupiippuvaikutus

Savupiippuilmiössä lämmennyt, tiheydeltään pienentynyt huoneilma nousee ylöspäin ja aiheuttaa huoneen yläosaan ylipainetta. Tästä ilmiöstä seuraa tilanne, jossa kylmä ilma virtaa sisään rakennuksen alaosasta ja lämmin ilma ulos rakennuksen yläosista. (Paloniitty 2012, 9.)

Huoneilman alipaineisen alaosan ja ylipaineisen yläosan välissä on niin sanottu neutraaliakseli, jossa paine vastaa ulkoilman painetta. Neutraaliakselin sijainti riippuu rakennuksen tiiveydestä. Akseli sijaitsee ylhäällä, jos vuotokohdat ovat rakennuksen yläosissa ja rakennuksen alaosassa on suurempi alipaine. Jos taas vuotokohdat sijaitsevat rakennuksen alaosissa, on yläosan ylipaine suurempi ja neutraaliakselin sijainti rakennuksen alaosassa. (Paloniitty 2012, 9.)

Mitä korkeampi rakennus on ja mitä suurempi lämpötilaero ulko- ja sisätiloissa vallitsee, sitä voimakkaampi on savupiippuilmiön aiheuttama paine-ero. Savupiippuilmiön aiheuttamien paine-erojen suuruus voidaan laskea kaavasta 2 (Björkholtz): (Paloniitty 2012, 9.)

$$\Delta p = 0,043 \cdot \Delta t \cdot h$$

KAAVA 2

$$\Delta t = t_s - t_u \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h = \text{etäisyys neutraaliakselista [m]}$$

$$\sqrt{\Delta p} = \text{neliöjuuri paine-erosta}$$

2.1.2 Tuulen vaikutus paine-eroon

Tuuli voi aiheuttaa paine-eron sisä- ja ulkoilman välille. Paine-eron suuruus riippuu tuuleen voimakkuudesta ja suunnasta sekä rakennuksen muodosta ja sijainnista. Myös rakennuksen korkeus ja suojaisuus vaikuttavat paine-eron suuruuteen. Mitä korkeampi ja suojaamattomampi rakennus on, sitä suurempi on muodostuva paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä.

Tarkan tuulipaine kentän määrittäminen rakennuksiin on vaikeaa. Yleisesti tuulen aiheuttamaa painetta voidaan kuitenkin arvioida Bernoullin kaavan 3 mukaisesti:

$$p = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v^2$$

KAAVA 3

c = rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuva vakio

ρ = ulkoilman tiheys [kg/m^3]

v = tuulen nopeus [m/s]

Ylipaine siis kohdistuu tuulenpuoleiseen seinään ja alipaine tuulen vastakkaiselle seinälle. Kattoon kohdistuvan paineen laskentaan vaikuttavat katon kaltevuus ja koko sekä tuulen pyörteisyys. (Paloniitty 2012, 10.)

2.1.3 Ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttama paine-ero

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmiä ovat painovoimainen, koneellinen poistotai koneellinen poisto- ja tuloilmanvaihto. Painovoimainen ilmanvaihto perustuu savupiippuilmistöön, jossa vaipan rakojen ja tuloilmaventtiilien kautta virtaava kylmä ilma lämpenee ja nousee ylöspäin. Lämmennyt ilma poistuu poistoventtiilien kautta ulkoilmaan. Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta on sitä parempi, mitä suurempi lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä vallitsee. Myös voimakas tuuli parantaa painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaa. Ongelmat tässä ilmanvaihtojärjestelmässä esiintyvät tyynellä lämpimällä kesäpäivällä, jolloin lämpötilaeroja ei ole eikä tuuli aiheuta paine-eroa rakenteiden välille. (Paloniitty 2012, 12.)

Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän ongelmien ratkaisuksi on kehitetty koneelliset, ilmanvaihtoa tehostavat järjestelmät. Koneellisesti hoidettu poistoilmanvaihto puhaltaa likaisen ilman sisältä venttiilien kautta ulos ja synnyttää samalla rakennukseen alipaineen, jolloin puhdas ulkoilma pääsee taas virtaamaan tuloventtiilien kautta rakennukseen sisälle. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä voidaan lisäksi puhdistaa, lämmittää ja jäähdyttää raitakas ulkoa tuleva ilma. Tämä järjestelmä on kaikkein tehokkain tapa hoitaa rakennuksen ilmanvaihto sen säädeltävyyden vuoksi. (Paloniitty 2012, 12.)

Yleensä ilmanvaihtojärjestelmä säädetään siten, että sisälle syntyy pieni alipaine, jotta esimerkiksi kostea sisäilma ei vaurioittaisi rakenteita. Tässä yhteydessä vaipan tiiveydellä on suuri merkitys ilmanvaihdon toimivuuteen ja mitoittamiseen. Mitä tiiviimpi vaippa on, sitä tarkemmin koneellinen ilmanvaihto toimii. (Paloniitty 2012, 12.)

2.2 Ilmavuotojen seuraukset

Huono ja väärin säädetty ilmanvaihto tai pelkästään savupiippuilmio aiheuttavat rakennukseen ylipainetta. Yleensä ylipaine muodostuu rakennuksen yläosiin, kuten kattorakenteisiin ja ullakkotiloihin. Ylipaineisesta rakennuksesta lämmin sisäilma pyrkii kulkeutumaan ilmavuotojen kautta ulos, mikä aiheuttaa sisäilman kosteuden kondensoitumisriskin rakenteiden kylmiin ulko-osiin ja voi siten aiheuttaa kosteus- ja homevaurioita. Tämä selittyy kosteuden konvektiolla eli ilman kulkiessa ilmavuodon kautta sen mukana kulkeutuu myös ilman sisältämä vesihöyry. Kosteusvirta voidaan laskea kaavasta 4: (Paloniitty 2012, 16.)

$$g = v \cdot Q$$

KAAVA 4

g = kosteusvirta [g/s]

v = vesihöyrynpitoisuus ilmassa [g/m³]

Q = ilmavirta [m³/s]

Alipaineisessa rakennuksessa ulkoilma pyrkii virtaamaan sisälle rakennukseen. Tämä ei aiheuta kosteuden tiivistymistä, koska ulkoilma on yleensä kuivempaa kuin sisäilma. Huono ilmatiiveys voi kuitenkin tässä tapauksessa aiheuttaa vedontunnetta ja mahdollistaa homeiden, epäpuhtauksien ja haitallisten aineiden kulkeutumisen talon rakenteista, ulkoilmasta ja maaperästä ilmavuotojen kautta sisäilmaan. (Paloniitty 2012, 20.)

Vähäiset ilmavuodot siis edistävät asumisviihtyvyyttä. Hyvä ilmatiiveys parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa sekä nostaa sisäilman laatua. (Paloniitty 2012, 20.)

2.2.1 Ilmavuotojen vaikutus lämmitysenergiankulutukseen

Lämmitysenergian määrä, joka tarvitaan rakenteiden kautta virtaavan vuotoilman lämmittämiseen, saadaan laskettua kolmen kaavan avulla. Kaavat löytyvät Suomen Rakennusmääräyskokoelman osasta D3 2012. Lähtötietoina tarvitaan rakennuksen ilmanvuotoluku q_{50} , vaipan ala, paikkakunnan lämmöntarveluku/astepäiväluku ja tarkastelujakson pituus.

Sisään ja ulos kulkeutuvan vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia $Q_{\text{vuotoilma}}$ lasketaan kaavalla 5: (Paloniitty 2012, 18.)

$$Q_{\text{vuotoilma}} = H_{\text{vuotoilma}} * (T_s - T_u) * \Delta t / 1000 \quad \text{KAAVA 5}$$

$H_{\text{vuotoilma}}$ = vuotoilman ominaislämpöhäviö, W/K

T_s = sisälämpötila [°C]

T_u = ulkolämpötila [°C]

Δt = ajanjakson pituus [h]

1000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Vuotoilman ominaislämpöhäviö $H_{\text{vuotoilma}}$ lasketaan kaavalla 6:

$$H_{\text{vuotoilma}} = \rho_i * c_{pi} * q_{v, \text{vuotoilma}} \quad \text{KAAVA 6}$$

ρ_i = ilmantiheys, 1,2 kg/m³

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000Ws/(kgK)

$q_{v,}$ = vuotoilmavirta [m³/s]

Vuotoilmavirta q_v lasketaan kaavalla 7:

$$q_{v, \text{vuotoilma}} (m^3/s) = (q_{50} / 3600 * X) * A_{\text{vaippa}} \quad \text{KAAVA 7}$$

X = kerroin:

1-kerroksiset 35

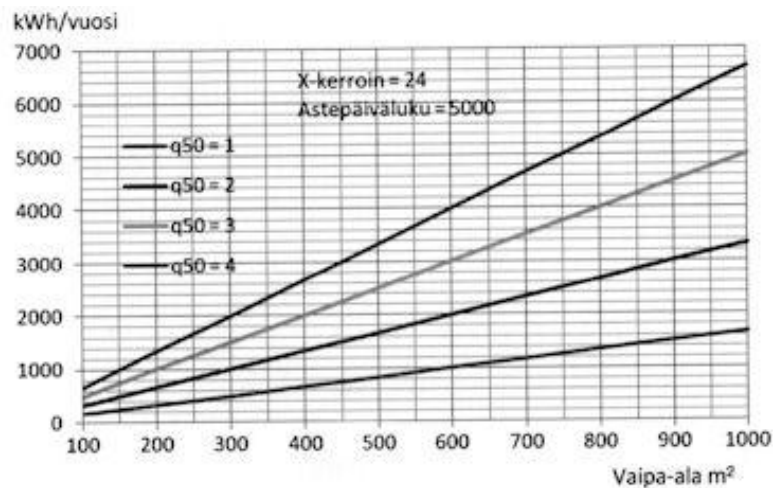
2-kerroksiset 24

3-4 kerroksiset 20

5-kerroksiset ja sitä korkeammat 15.

X-kertoimella muutetaan 50 Pa:n paine-erolla tapahtuva ilmapuotomäärä vastaamaan normaalin käyttötilanteen paine-erolla tapahtuvaa ilmapuodon määrää. Luvut perustuvat kenttäkokeissa saatuihin tuloksiin. (Paloniitty 2012, 18.)

Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty pientalojen energiankulutus kWh/vuodessa eri ilman vuotoluvuilla (1-4) suhteessa rakennuksen vaipan alaan. X-kerroin 24 ja lämmöntarveluku 5000vrkC ovat vakioitu. Kuvasta ilmenee, että energiankulutus muuttuu lineaarisesti. (Paloniitty 2012, 19.)



KUVA 1. Hallitsemattomien ilmanvuotojen kautta kulkeutuvan vuotoilman lämmittämiseen kuluva energia pienissä rakennuksissa (Paloniitty 2012, 20)

On kuitenkin muistettava, että ilmatiiveys on vain yksi energiatehokkuuteen vaikuttava tekijä. Rakennuksen vaipan, sääolosuhteiden, taloteknisten järjestelmien ja käytön yhteisvaikutus ja järjestelmien yhteen sovittaminen määräävät lopulta rakennuksen energiatehokkaan toimivuuden. (Paloniitty 2012, 20.)

2.3 Ilmavuodot osana uusia energiamääräykset

Hyvä ilmatiiveys on osa rakennuksen energiatehokkuutta. Vähäiset vuotoilma- virtaukset ja lämmön talteenottolaitteen avulla hoidettu ilmanvaihto säästävät energiaa. Energiatehokkaassa talossa on hyvä eli pieni ilmavuotoluku. (RakMK D3 2012. 2011.)

Energiamääräykset ovat tiukentuneet, minkä myötä myös ilmavuotoluvun suositusarvo on pienentynyt. Uusimmat määräykset uudisrakennusten energiatehokkuudesta on annettu maaliskuussa 2011 ja ne astuivat voimaan 1.7.2012. Uusissa määräyksissä rakennuksen energiatehokkuutta tarkastellaan kokonaisvaltaisesti. Käytännössä määräysten tiukennus tarkoittaa keskimäärin 20 prosentin parannusta entisten määräysten vaatimaan energiatehokkuuteen. 1.7.2012 siirryttiin rakennuksen kokonaisenergiailuvun, E-luvun, laskentaan. E-luku tarkoittaa energiamuotojen kertoimilla painotettua rakennuksen vuotuisen osastoenergian laskennallista kulutusta lämmitettyä nettoalaa kohden. Käytetyillä energiamuodoilla on eri kertoimet, esimerkiksi sähkön kerroin on 1,7, kauko-

lämmön 0,7 ja uusiutuvilla polttoaineilla kuten pelletillä 0,5. (RakMK D3 2012. 2011.)

Uusiutuvilla ja ympäristöystävällisillä energiamuodoilla on siis pienemmät ker-
toimet. Uusien määräysten myötä aikaisemmin käytetty ilmanvuotoluku n_{50} kor-
vataan uudella q_{50} -luvulla. n_{50} -luvussa vuotoilman määrä on laskettu rakennuk-
sen tilavuuteen nähden, kun taas q_{50} -luvussa se on laskettu rakennuksen vai-
pan pinta-alaan nähden. Uusi ilmanvuotoluku q_{50} -luku kuvaa tarkemmin myös
suurempien rakennusten todellista ilmatiiveyttä kuin n_{50} -luku. (RakMK D3 2012.
2011.)

Uusien määräysten mukaan rakennuksen ilmanvuotoluku q_{50} saa enintään olla 4
[$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. Tämän arvon voi ylittää, jos rakennuksen käytön vaatimat raken-
teelliset ratkaisut huonontavat merkittävästi ilmatiiveyttä. Tasauslaskelmassa
ilmanvuotoluvun vertailuarvo on 2 [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. Ohjeellinen suositusluku on alle 1
[$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] ja passiivitalon kriteerit täyttävän rakennuksen ilmanvuotoluku tulee
olla alle 0,6 [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] (RakMK D3 2012. 2011.)

TIIVIYSMITTAUSLUOKITUS



KUVA 2. Tiiviyssmittausyksiköiden q_{50} ja n_{50} energialuokituksena käytetyt rajat
(Paloniitty 2012, 64)

2.4 Tiiveysmittaus

Energiatehokkaassa rakentamisessa vaipan ilmatiiveys on tärkeä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, sisäilmaston viihtyvyyden kannalta sekä energiakulutuksen vähentämisen kannalta. Rakennusten ilmanpitävyyden mittaaminen rakennustenlaadunvalvontamittauksena on yleistynyt merkittävästi viimeisten kahden vuoden aikana. Rakenteiden ilmatiivyydestä on puhuttu kymmeniä vuosia, mutta vasta energiatodistuksen myötä ilmatiiveyden osoittaminen mittaamalla on yleistynyt ja se on tullut pysyäkseen yhtenä rakennuksen vaipan kunnan tutkimisen muotona lämpökuvauksen yhteyteen. (RT 80-10974. 2009.)

Hyvän ilmatiiveyden saavuttaminen rakennuksen vaipparakenteissa on tärkeä monestakin syystä. Ehkä tärkeimpänä yksittäisenä tekijänä voidaan pitää rakennuksen vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistamista. Siirtäessä entistä paremmin eristäviin vaipparakenteisiin tulee hallitsemattoman vuotoilman kulkeutuminen rakenteen sisään estää, jotta vältetään rakenteiden kosteus- ja homevaurioriskeiltä. Jos vaipparakenteissa on ilmavuotoreittejä, voi sisäilman kosteus kulkeutua ilmavirtausten mukana kylmiin rakenteiden osiin ja aiheuttaa kosteusvaurioriskin. (RT 80-10974. 2009.)

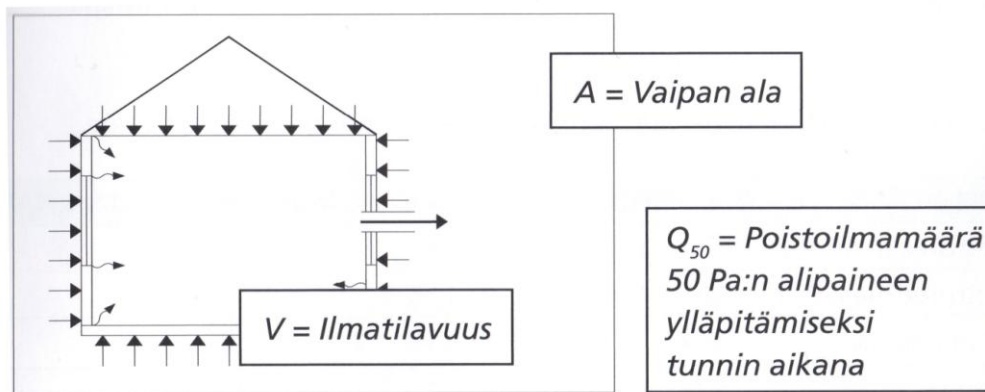
Toinen merkittävä syy hyvään ilmatiiveyteen on hyvän asumisviihtyvyyden saavuttaminen. Kylmän ulkoilman virtaaminen sisätiloihin aiheuttaa vedon tunnetta ja pahimmilleen lisää terveyshaittariskejä. Vaipan hyvä ilmanpitävyys parantaa sisäilman laatua, koska vedontunne vähenee ja mahdollisten homeiden, epäpuhtauksien ja haitallisten aineiden kulkeutuminen talon rakenteista, maaperästä ja ulkoilmasta sisäilmaan vähenee. Lisäksi hyvä ilmanpitävyys parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, koska kostea sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin ja toisaalta siksi, että kylmä ulkoilma ei pääse jäähdyttämään rakennetta ja aiheuttamaan materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin homeen kasvulle otollisia olosuhteita tai kosteuden tiivistymisriskiä. (RT 80-10974. 2009.)

Kolmas merkittävä tekijä hyvään ilmatiiveyteen pyrkimisessä on energiakulutuksen pienentäminen. Hallitsemattomalla vuotoilmalla on suuri vaikutus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Esimerkiksi pientaloissa laskennallinen kokonaisenergiankulutuksen lisäys on keskimäärin 4 % jokaista n_{50} -luvun koko-

naisyksikön lisäystä kohti. Vuotoilman tarvitseman energian osuus suhteessa kasvaa siirryttäessä matalaenergiarakentamisen suuntaan. (RT 80-10974. 2009.)

2.4.1 Paineekoe

Rakennuksen tiiveyttä mitataan painekokeella, jossa rakennuksen sisälle aiheutetaan paine-ero ulkoilmaan nähden puhaltimen avulla. Puhallin asennetaan yleensä ulko-oveen tai vaihtoehtoisesti ikkunan tuuletusluukun paikalle. Myös rakennuksen omaan ilmanvaihtolaitteistoa voidaan käyttää puhaltimena. (Paloniitty 2012, 29.)



KUVA 3. Rakennuksen tiiveysmittauksen periaate (Paloniitty 2012, 29)

Paineekoe eli mittaus tehdään usealla paine-erolla, yleensä vähintään viidellä. Paine-eron ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan. Tämä ilmamäärä jaettuna tutkittavan tilan ilmatilavuudella antaa tulokseksi ilmavuotoluvun n_{50} tai ilmamäärä jaetaan vaipan alalla, jolloin tulokseksi saadaan ilmavuotoluku q_{50} . Ilmavuotoluku n_{50} esitetään yksikössä 1/h, vaihtoa tunnissa. Ilmavuotoluku q_{50} esitetään yksikössä $[m^3/(h \cdot m^2)]$. Ilmavuotoluku n_{50} lasketaan kaavalla 8: (Paloniitty 2012, 29.)

$$n_{50} = Q_{50}/V$$

KAAVA 8

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

Q_{50} = painekokeella mitattu ilmavirtaus 50 Pa paine-erolla $[m^3/h]$

V = rakennuksen/mitattavan osan sisättilavuus $[m^3]$

Ilmavuotoluku q_{50} lasketaan kaavalla 9:

$$q_{50} = Q_{50}/A$$

KAAVA 9

q_{50} = rakennuksen ilmavuotoluku 50 Pa paine-erolla [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]

Q_{50} = painekokeella mitattu ilmavirtaus 50 Pa paine-erolla [m^3/h]

A = rakennuksen/mitattavan osan ulkovaipan ala [m^2]

Painekoe tehdään standardin SFS-EN 13829 mukaan. Standardissa esitellään menetelmät A ja B. Menetelmä B on yleisimmin käytetty. Mittausmenetelmässä B rakennukseen tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot, kuten ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistokanavat ja korvausilmaventtiilit sekä tulisijat ja hormit, suljetaan tiiviisti. Käytännössä kaikki aukot siis teipataan kiinni. Painekokeessa pyritään saavuttamaan 50 Pa:n paine-ero, mutta ilmavuotoluku voidaan laskea myös alempien paine-erojen mittaustuloksista. Hyvänä esimerkkinä voidaan ottaa mittaus toteutettuna viidellä paine-erolla 20 - 60 Pa:n välillä (20, 30, 40, 50 ja 60 Pa). Painekoe on hyvä tehdä sekä yli- että alipainekokeella. (RT 80-10974. 2009.)

Mittauksen aikana tulisi sään olla suhteellisen selkeä. Sisä- ja ulkolämpötilojen erotus kerrottuna rakennuksen korkeudella tulisi olla alle $500 \text{ m}^\circ\text{C}$, jotta savupiippuilmioilla ei olisi vaikutusta mittaustuloksiin. Lisäksi tuulen nopeus tulee olla alle 6 m/s. Nämä sääolot ovat ehtona luotettavalle tiiveysmittaukselle, ja ne kirjataan ylös sekä syötetään koneelle ennen itse tiiveysmittausta. Lisäksi tulee kirjata lähimmän sääaseman antama ulkoilman paine mittauspäivänä. (RT 80-10974. 2009.)

Ennen mittausta on päätettävä mitattavien tilojen rajat. Mittaukseen otetaan mukaan ulkovaipan rajaamat tilat, kaikki lämpimät ja pääkäyttötarkoituksen mukaiset tilat sekä ilmanvaihtoteknisesti samaa osastoa olevat tilat. Kun tilat ovat selvillä, määritetään rakennuksen tilavuus ja vaipan-ala. Rakennuksen ilmatilavuus on huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan lasketun pinta-alan tulo. Välipohjia ei lasketa ilmatilavuuteen. Vaipan alaan lasketaan ulkoseinien pinta-ala sisämittojen mukaan sekä yläpohjan ja alapohjan ala. Aukkoja ei vähennetä vaipan alasta. Rakennuksessa olevia kattojen alaslaskuja tai muita

sisäpuolisia rakennusosia ei vähennetä ilmatilavuudesta tai vaipan alasta. (RT 80-10974. 2009.)

Kun oheismittaukset on tehty, tarvittavat suureet määritetty ja kaikki syötetty mittausohjelmaan, pystytetään mittalaitteisto. Rakennuksen yhteen ovi- tai ikkuna-aukkoon kiinnitetään puhallin käyttäen valmista kehikkoa ja tiivistyskangasta. Paineita mittaavat letkut kiinnitetään mittalaitteeseen ja laitteisto kytketään verkkovirtaan. Seuraavaksi rakennuksen sisälle luodaan paine-ero sisä- ja ulkoilman välille joko puhaltamalla ilmaa sisään (ylipaine) tai imemällä sitä ulos (alipaine). Ennen puhallussarjaa on kuitenkin tehtävä lähtöpaine-eron mittaus, jolloin puhallinaukko on peitetty. Lähtöpaine-eron tulisi olla alle 5 Pa. Jos tämä arvo kuitenkin ylittyy, voidaan mittauksia jatkaa, mutta tällöin tulee tehdä sekä ylipainemittaus. Kone suorittaa mittaukset tasaisin paine-eroin, kunnes suurin paine-ero on vähintään 50 Pa. (RT 80-10974. 2009.)

Puhallussarjan jälkeen suoritetaan loppupaineen mittaus, jossa puhallinaukko on jälleen peitetty. Tulosta ei tule hyväksyä, jos lähtöpaineen ja loppupaineen paine-ero on yli 5 Pa. Tämän jälkeen tietokone mallintaa saatujen tietojen pohjalta rakennuksen ilmanvuotokäyrän ja laskee ilmanvuotoluvun. Mikäli mittaus suoritetaan yli- ja alipaineisena, on rakennuksen ilmanvuotoluku näiden tulosten keskiarvo. Lisäksi ohjelma kertoo vuotokohtien yhteenlasketun pinta-alan. (RT 80-10974. 2009.)

2.4.2 Tarvittavat laitteet

Tiiveysmittaus tehdään yleensä kaupallisilla tiiveysmittauslaitteistoilla. Mittauksen voi myös tehdä rakennuksen omilla ilmanvaihtojärjestelmillä, mutta luotettavamman tuloksen varmistamiseksi on syytä käyttää kalibroitua, tiiveysmittauslaitteita varten valmistettua laitteistoa. Suomessa käytetään ainakin neljän eri valmistajan tiiveysmittauslaitteita. Tärkeintä laitteiston valinnassa on huomioida käyttötarkoitus eli minkä tyyppistä ja kokoista kohdetta ollaan mittaamassa. Suomen markkinoilta löytyvät laitevalmistajat ovat Minneapolis, Retrotec, Wöhler sekä Swema. (Paloniitty 2012, 30.)

Valmistajasta riippumatta mittalaitteisiin kuuluu aina ilmamäärämittauksella varustettu puhallinyksikkö, paine-eromittausyksikkö, ikkuna- tai ovikehys ja laka-

na, ohjainyksikkö sekä virtajohdot ja paine-eroletkut. Tämä kalusto riittää mittauksen suorittamiseen, mutta käytännöllisemmin mittauksesta suoriutuu tietokoneen avulla. Kun laitteisto on kytketty tietokoneeseen ja tietokoneeseen on asennettu laitevalmistajan tietokoneohjelma, ohjelma ohjaa automaattisesti mitausta, tekee tarvittavat laskelmat sekä luo tuloksista mittausraportin. Tietokoneohjelmat ja raportointitavat vaihtelevat eri laitevalmistajien välillä. Tämän opinnäytetyön mittaukset on suoritettu Minneapolis-laitteistolla (kuva 4). (Paloniitty 2012, 30)



KUVA 4. Minneapolis-laitteisto sisältöineen (Paloniitty 2012, 33)

Puhaltimen puhalluskapasiteetti ja käyttöalue kertovat sen, minkä kokoiseen kohteeseen ja mittaukseen puhallin soveltuu. Suuret puhaltimet varustettuna tehokkaalla moottorilla pystyvät puhaltamaan jopa yli 13 000 kuutiometriä ilmaa tunnissa. Ongelmaksi suurille puhaltimille muodostuu pienten ilmamäärien tarkka mittaaminen. Tätä varten valmistajat ovat kehittäneet puhallinaukkoihin asennettavia kuristerenkaita, joilla aukon kehää saadaan pienennettyä ja ilmamäärän mittausta tarkennettua (kuva 5). (Paloniitty 2012, 32)



KUVA 5. Minneapolis-laitteisto käyttövalmiina (Paloniitty 2012, 31)

Tiiveysmittauslaitteiston lisäksi tiiveysmittauksen suorittamiseen tarvitaan seuraavia laitteita ja tarvikkeita (Paloniitty 2012, 34):

- lämpömittari sisä- ja ulkolämpötilan mittausta varten
- etäisyysmittalaite rakennuksen tilavuuden ja vaipan-alan määrittämiseen, mikäli mittoja ei saada piirustuksista
- teippiä ja muovia tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehtyjen aukkojen, tulisijojen ja hormien sulkemista varten
- lämpökamera, jolla voidaan paikantaa ilmavuotokohtat
- tikkaat, joiden avulla voi tukkia korkeissa tiloissa olevat ilmanvaihtoventtiilit tai tarvittaessa kiivetä katolle
- ilmapalloja ja pumppu, joiden avulla on mahdollista tukkia muun muassa ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistokanavien päät tai aukot, joita on mahdoton sulkea teipin ja muovin avulla

2.4.3 Virheeseen vaikuttavat asiat

Kaikkiin mittauksiin sisältyy mittausvirhettä. Mittausvirhe syntyy ilmamäärän mittausvirheestä sekä rakennuksen suureiden mittausvirheistä. Mittauksen suorittajan täytyy tietää käyttämänsä laitteen käyttöalue ja tuntea sen toimintaperiaate, jotta ilmamäärän mittauksessa syntyvä virhe voidaan minimoida. Rakennuksen suureiden mittaus on syytä suorittaa useampaan kertaan ja mahdollisesti eri henkilöiden toimesta, jolloin mahdolliset mittausvirheet tulevat ilmi ja ne ovat korjattavissa. Lisäksi tiiveysmittaajan tulee huolehtia, että mittauslaitteisto on kalibroitu ja se on voimassa. Kalibroitodistus on hyvä pitää laitteiston mukana, jotta se on mahdollista esittää mittauksen tilaajalle. (Paloniitty 2012, 57)

2.4.4 Vuotokohtien paikantaminen

Ilmavuotokohtien paikantaminen on oleellinen osa tiiveysmittausta. Ilmavuotokohtien paikantamisella voidaan todentaa, että esivalmisteluissa tehdyt teippaukset ja tulppaukset ovat onnistuneet ja saadut mittaustulokset ovat paikkaansa pitäviä. Kun havaitut ilmanvuotokohdat on paikannettu, tiiveysmittaaja ilmoittaa niistä tilaajalle ja kertoo minkä suuruisesta vuotokohdasta on kyse. Ilmavuotokohtien paikantaminen on hyvin tärkeää varsinkin uusille ja vielä rakenteilla oleville rakennuksille. Kun vuotokohta havaitaan varhaisessa vaiheessa, on sen korjaaminen helpompaa ja edullisempaa. (Paloniitty 2012, 58)

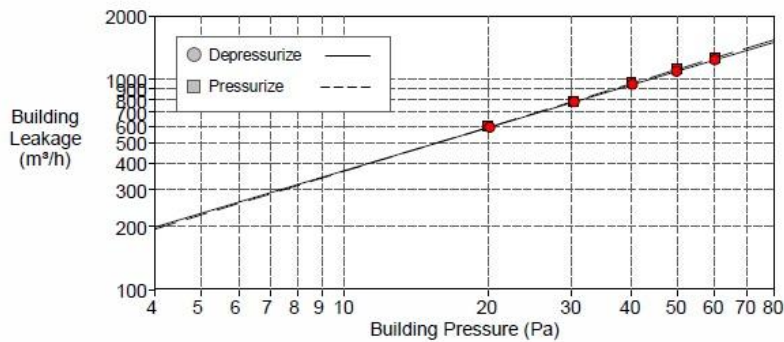
Ilmavuotokohtien paikantaminen tapahtuu joko lämpökuvauksella tai merkisavulla. Lämpökuvauksen etuja ovat tarkat ja luotettavat tiedot vuotojen laadusta, laajuudesta ja sijainnista. Huonona puolena mainittakoon olosuhteiden vaikutus mittaustarkkuuteen. Pienet lämpötilaerot voivat aiheuttaa ongelmia kuvien tulkintaan. Merkkisavun käyttöä vuotokohtien paikantamiseen tulee välttää kohteissa, joissa on palohälyttimiä. (Paloniitty 2012, 58)

2.4.5 Raportointi

Rakennuksen tiiveysmittaukset tehdään aina vähintään mittausdokumentti eli tiiveysmittauspöytäkirja (kuva 6). Tiiveysmittauspöytäkirja toimii tiiveystodistuksena esimerkiksi rakennusvalvontaa varten. Mikäli asiakkaan kanssa on sovittu laajemmasta tutkimusraportista, laaditaan kohteesta tiiveysmittausraportti. Ilma-

vuotokohtien paikantamisesta tehdään yleensä erillinen tiiveysmittausraportti tai vaihtoehtoisesti vuotokohdat kuvataan tiiveysmittausraporttiin. (Paloniitty 2012, 63)

	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m³/h)	1094 (+/- 0.0 %)	1115 (+/- 0.1 %)	1104
n50: Air Changes per Hour (1/h)	4.29	4.37	4.33
w50: m³/(h*m² Floor Area)	10.72	10.93	10.83
q50: m³/(h*m² Surface Area)	3.52	3.59	3.55
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)	411.9 (+/- 0.1 %)	408.7 (+/- 0.6 %)	410.3
cm²/m² Surface Area	1.32	1.31	1.32
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)	214.1 (+/- 0.2 %)	209.2 (+/- 1.0 %)	211.6
cm²/m² Surface Area	0.69	0.67	0.68
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	77.2 (+/- 0.3 %)	74.9 (+/- 1.5 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	78.0 (+/- 0.3 %)	74.5 (+/- 1.5 %)	
Exponent (n)	0.675 (+/- 0.001)	0.692 (+/- 0.004)	
Correlation Coefficient	1.00000	0.99995	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
Inside Temperature:	23 °C	Volume:	255 m³
Outside Temperature:	8 °C	Surface Area:	311 m²
Barometric Pressure:	100290 Pa	Floor Area:	102 m²
Wind Class:	3 Gentle Breeze	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Partly Exposed Building	Building Dimensions:	3 %
Type of Heating:	Kaukolämpö	Year of Construction:	1976
Type of Air Conditioning:	Painovoimainen		
Type of Ventilation:	None		



KUVA 6. Tiiveysmittauspöytäkirja malli

3 ILMATIIVEYDEN TOTEUTUS 1980- JA 1990-LUVUN RAKENTEISSA

Pientalojen arkkitehtuuria hallitsi 1980- ja 1990-luvuilla yksikerroksisuus, vaikka monessa tilanteessa toinen kerros olisi tarjonnut maisemaa laajemmin nähtäväksi. Useampikerroksisuus tekisi myös pientalon käyttötavoiltaan monipuolisemmaksi. Kellarikerroksia ei toteutettu juuri ollenkaan, vaikka siellä olisi voinut sijaita monia asumista hyvin palvelevia aputiloja kuten askarteluhuone ja joukko lämpimiä varastoja. (Partek 1989, 12)

1980- 1990-luvun pientalojen runkorakenteet olivat pääsääntöisesti puuta. Ulkoseinät toteutettiin puurangasta, yläpohjien kantavana runkona toimivat puuristikot ja välipohjissa puupalkisto. Ainoa poikkeus oli alapohjat, jotka toteutettiin yleensä maanvaraisella betonilaatalla. Höyryn- ja ilmansulkukerros toteutettiin yleensä samalla ainekerroksella. Höyryn - ja ilmansulkukerrosena toimi pääsääntöisesti muovikalvo. (Partek 1989, 25)

3.1 Ilmatiiviiden rakenteiden toteutus

Rakennuksen rakenteista löytyy yleensä erillinen ilmansulkukerros, jolla ilmatiivyyden toteutetaan. Erillistä ilmansulkukerrosta ei tarvita mikäli rakenne itsessään on riittävän ilmatiivis. Kerroksellisissa rakenteissa tarvitaan aina höyrynsulku. Höyrynsulku toimii usein myös ilmansulkukerrosena. (Aho - Korpi 2009, 10)

Muuratuissa harkkorakenteissa tasoitekerros toimii yleensä ilmansulkukerrosena. Puurakenteissa taas on erillinen kalvomainen tai levymäinen ilman- ja höyrynsulkukerros. Puurakenteissa yleensä ilmansulku ja höyrynsulku toteutetaan yhdellä yhteisellä kerroksella, jolloin sulun tulee olla lähellä rakenteen lämmintä sisäpintaa. Massiiviset ja itsestään ilmatiiviit rakenteet eivät tarvitse erillistä ilmansulkukerrosta. (Aho - Korpi 2009, 10)

Olipa rakenne mikä tahansa, suurta huomiota on kiinnitettävä rakenteiden liitoksiin. Ilmatiiviin kerroksen tulee jatkua yhtenäisesti koko rakennuksen vaipan ympäri, joten eri rakennekerrosten liitoksissa ilmansulut tulee limittää ja tiivistää huolellisesti toisiinsa. Suositeltava limityksen leveys on vähintään 150mm. Huo-

limattomasti tehdyistä liitoksista aiheutuu erilaisia ongelmia, riippuen ilmapuotokohdan sijainnista. Rakenteiden ja etenkin rakenteiden liitosten ilmatiivis toteuttaminen vaatii huolellista suunnittelua. Rakennedetaljit ovat suunnittelun työkalu ilmatiivyyden varmistamiseksi. Suunnittelussa tulee myös huomioida, että käytetyt ratkaisut kestävät koko rakennuksen käyttöajan. Rakenteiden tulee kestää pieniä muodonmuutoksia ilman merkittäviä halkeamia tai repeämiä. (Aho - Korpi 2009, 10)

Huolellisen suunnittelun jälkeen työmaalla tapahtuva toiminta ratkaisee sen, saavutetaanko haluttu lopputulos. Kun työmaan henkilökunta omaa tarvittavan tietotaidon ja motivaation, ei ongelmia synny. Rakennusaikana ilmasulkuun syntyvät reiät tulee paikata ilmasulkukerroksen tyypistä riippuen joko vaahdottamalla, kittaamalla tai riittävän tartuntakykyisellä ja pitkäaikaiskestävällä teipillä. Puristusliitosten käyttäminen ilmasulkukerrosten limittämisessä takaa varimmman ja kestävimman lopputuloksen pitkällä aikajänteellä. Tärkeintä on huomioida itse ilmasulkuna käytettävän materiaalin kestävyys. Jälkeenpäin tehtävät parannukset edellyttävät usein rakennekerrosten avaamista tai jopa uusimista. (Aho - Korpi 2009, 11)

3.1.1 Ulkoseinät

Puurakenteiset ulkoseinät ovat hyvin yleisesti käytetty runkorakenne asuinrakennuksissa. Puurankaseinissä ilmatiiveys toteutetaan yleensä erillisellä ainekerroksella, joka toimii sekä ilman- että höyrynsulkuna. Ilman- ja höyrynsulkukerroksen materiaali on tavanomaisesti jokin kalvomainen tuote kuten muovikalvo. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös levyjäisiä tuotteita, kuten solumuovieristelevyjä. Ilmasulkukerros sijoitetaan joko suoraan sisäverhouslevyn taakse tai noin 50mm etäisyydelle levystä lämmöneristeen sisään. Jälkimmäisellä tavalla toteutettuna ilmasulkukerros on paremmin suojassa esimerkiksi seinään lyötäviltä nautoilta ja puristusliitosten tekeminen kalvojen liitoskohtiin koolausrimoilla on mahdollista. Lisäksi sähköasiat ja sisäverhouslevyn takaiset sähköputkitukset voidaan toteuttaa ilmasulkukerrosta rikkomatta. (Aho - Korpi 2009, 12-15)

Muita seinätyyppejä ovat muun muassa harkkoseinät, puhtaaksimuuratut tiili-seinät, betoniseinät ja hirsiseinät. Harkkoseinillä ja puhtaaksimuuratuilla tiiliseinillä rakenteen ilmatiiveys perustuu pintakäsittelyihin. Ulkoseinän molemmat pinnat tulee käsitellä rappaamalla tai tasoittamalla. Betoniseinä on jo yksittäisenä rakenneosana ilmatiivis. Riittävän tiheä raudoitusta estää halkeamien syntymisen betoniseinään. Hirsiseinillä rakenteiden painuminen parantaa ajan myötä jonkin verran seinän ilmatiiveyttä. Suunnittelussa on varmistettava, ettei rungon painumista ole estetty eivätkä rakenneosien väliset painumaerot kasva merkittäviksi. (Aho - Korpi 2009, 16-17)

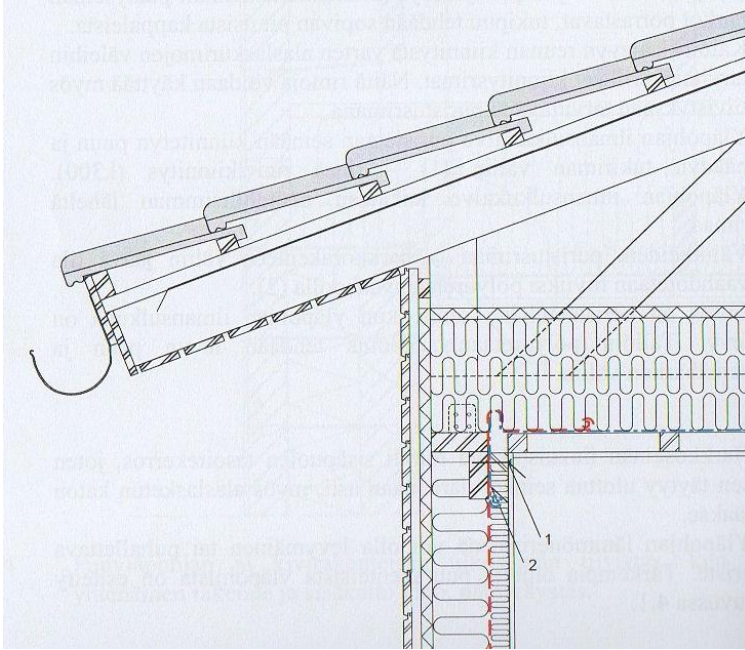
3.1.2 Yläpohjat

Suomessa yksi yleisimmin käytetty yläpohjaratkaisu on puurakenteinen yläpohja, kun tukena ovat joko puurankaseinät tai kivirakenteiset seinät. Puuyläpohjan ilmansulkukerros toteutetaan yleisesti lähes samalla tavalla kuin puurankaseinillä. Kalvomaista ilmansulkukerrosta käytettäessä on varmistettava riittävä tuenta eli koolaus, etteivät yläpuoliset lämmöneristeet pääse painamaan kalvoa tai sen liitoskohtaa, jolloin se ajan myötä venyy tai menee rikki. Ilmansulkukalvon liitokset tulee limittää ja teipata yhteen. Teippauksen lisäksi liitos kannattaa vielä puristaa puurimoilla tiiviisti yhteen. Jos taas ilmansulkukerrosena käytetään solumuovieristelevyä, tulee levyjen saumat tiivistää vaahdottamalla. Levyjen käytön etuna on niiden jäykkyys, joten ne kestävät yläpuolisen lämmöneristeen painon rikkoutumatta. Tiiveyden varmistamiseksi vaahdotetut saumat voidaan lisäksi teipata. (Aho - Korpi 2009, 18-19)

Kivirakenteiset yläpohjat ovat harvinaisempia pientalorakentamisessa. Kivirakenteiset yläpohjat tehdään yleensä ontelolaatoista tai esimerkiksi kevytbetonitaloissa kevytbetonista. Ontelolaatat sekä kevytbetonielementit ovat pääsääntöisesti ilmatiiviitä, mutta niiden saumat on tiivistettävä erikseen. Tiivistystapahtuu yleensä saumavalulla. Saumavalun lisäksi saumakohdan tiiveys yleensä vielä varmistetaan yläpuolisella hitsattavalla tai liimattavalla ilmansulkukaistalla kuten bitumikermillä. (Aho - Korpi 2009, 20)

Ulkoseinän ja yläpohjan liitoskohdan toteutuksessa tulee huomioida riittävän pitkät limitykset ilmansulkukerrosten välillä, kun ilmansulkukerrosena käytetään

ilmasulkukalvoja, jotta puristusliitokset on mahdollista tehdä (kuva 7). Lisäksi kalvoja ei tule kiristää nurkissa liian kireälle, jotta asennusvälissä mahdollisesti kuljetettavat sähköputket saadaan käännettyä seinästä yläpohjalle. Jos taas ilmansulkukerroksena käytetään eristelevyjä, tulee yläpohjan ja ulkoseinän levyjen välinen sauma vaahdottaa polyuretaanivaahdolla. (Aho - Korpi 2009, 50-55)

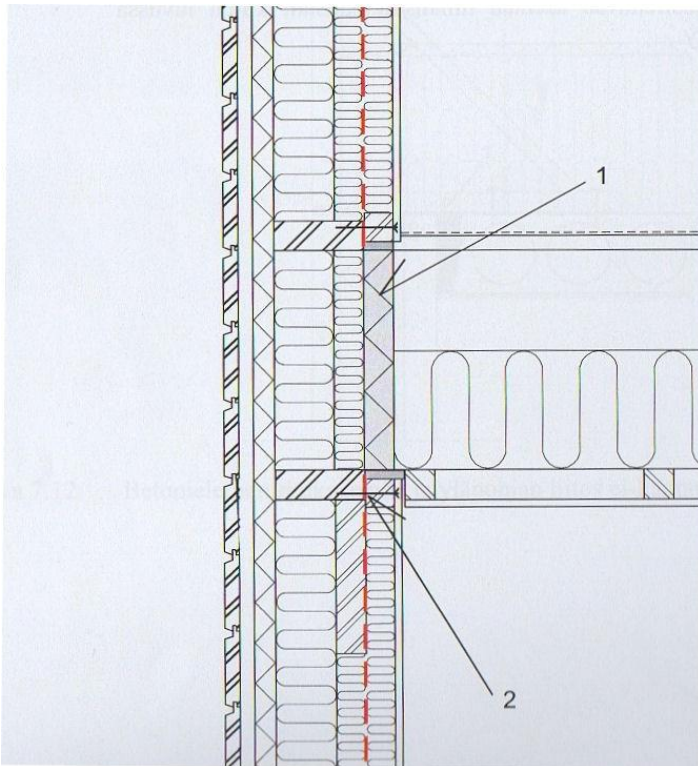


KUVA 7. Puurakenteisen yläpohjan ja ulkoseinän välinen liitos (Aho - Korpi 2009, 50)

3.1.3 Välipohja

Pientaloissa välipohjarakenne on yleisesti joko puupalkisto tai ontelolaatta. Välipohjan rooli ilmatiiviissä rakentamisessa on melko pieni, koska välipohja ei kuulu rakennuksen vaipan rakenteeseen. Tärkeintä ilmatiiveyden kannalta on välipohjan liitos kohta ulkoseinään. Liitoskohdan tiivistäminen riippuu niin ulkoseinän kuin välipohjankin materiaalista. Otetaan esimerkkinä puurakenteisen välipohjan puurankaulkoseinän liitos, jossa seinän ilmasulkuna on kalvo (kuva 8). Tällöin seinän ilmansulkukalvo puristetaan alemmassa kerroksessa sisäverhouksen yläpään kiinnitysrimalla tiiviisti seinän yläohjauspuuhun. Ylemmässä kerroksessa vastaavasti kalvo tiivistetään seinän alaohjauspuuhun. Välipohjan kohdalle, kantavien puupalkkien väliin, tiivistetään vaahdottamalla solu-

muovieristelevyt. Tiivistys tehdään levyn jokaiselta reunalta, palkkeihin ja seinän alaosan riman väliin. (Aho - Korpi 2009, 69)



KUVA 8. Puurakenteisen välipohjan ja ulkoseinän välinen liitos (Aho & Korpi 2009, 68)

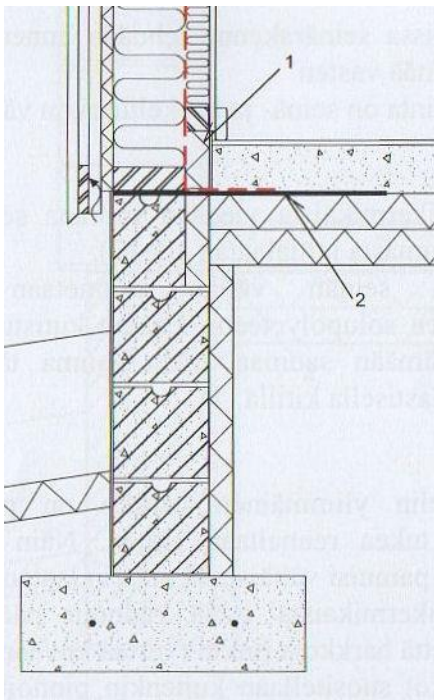
3.1.4 Alapohjat

Sisäilman laadun kannalta on hyvin tärkeää, että alapohjarakenne on ilmatiivis. Ilmatiiviisti toteutettu alapohja estää epäpuhtauksien kulkeutumisen ilmavirtausten mukana sisäilmaan. Yksi haitallisimmista alapohjien ilmavuotokohdista sisäilmaan virtaavista yhdisteistä on radon-kaasu. Radonin torjunta on huomioitava jo suunnittelu vaiheessa, etenkin niin sanotuilla radon-aktiivisilla alueilla. (Aho - Korpi 2009, 22)

Maanvaraiset alapohjat toteutetaan yleensä paikallaan valetuilla teräsbetonilaatoilla. Nämä teräsbetonilaatat ovat riittävän ilmatiiviitä, joten suurin huomio tulee kiinnittää rakenteen liitoskohtien ja läpivientien tiivistämiseen. Läpivientiputket

voidaan tiivistää putken ulkopuolelta valamalla ja tiiveyden varmistamiseksi läpiviennin juuri voidaan vielä viimeistellä kittaamalla. (Aho - Korpi 2009, 22)

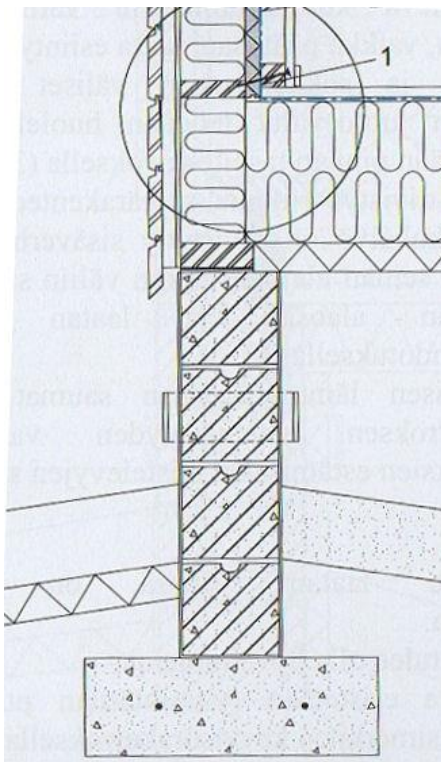
Alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa tulee huomioida alapohjan ja sokkelin välinen tiivistys sekä ulkoseinän ja alapohjan välinen tiivistys (kuva 10). Kumibitu-
mikermikaista toimii hyvänä eristeenä alapohjan ja sokkelin välillä. Kaista tuodaan alapohjan laatan alta sokkelin ja seinärakenteen alapinnan väliin ja ulotetaan sokkelin ulkopintaan asti. Ulkoseinän ilmansulku, riippuen ilmasulkukerroksesta ja alapohjan rakenteesta, joko ulotetaan alapohjan rakennekerrosten väliin ja limitetään kumibitumikaistan kanssa tai vaihtoehtoisesti se limitetään sokkelin sisäpuolisen eristeen kanssa ja saumakohta puristetaan tiiviisti. Lattialaatan ja kermin väliin jäävä rako täytetään vielä polyuretaanivaahdolla, joka estää ilmavuodot seinärakenteen alareunan ja kermikaistan välistä. (Aho - Korpi 2009, 24-36)



KUVA 10. Maanvaraisen betonilaatan ja puurunkoisen ulkoseinän välinen liitos (Aho - Korpi 2009, 28)

Tuulettuvat alapohjat toteutetaan yleensä ontelolaatoista, joiden alapintaan asennetaan lämmöneristelevyt. Lämmöneristelevyjen saumat on syytä vaahdottaa tiiviiksi polyuretaanivaahdolla lämmöneristekerroksen yhtenäisyyden varmistamiseksi. Usein ontelolaattojen päälle valetaan yhtenäinen pintabetonilaatta, jolloin erillisiä ilmasulkukaistoja samoihin ei tarvita. Lämpivientien tiivisty tapahtuu samalla tavalla kuten maanvaraisilla alapohjilla. (Aho - Korpi 2009, 22)

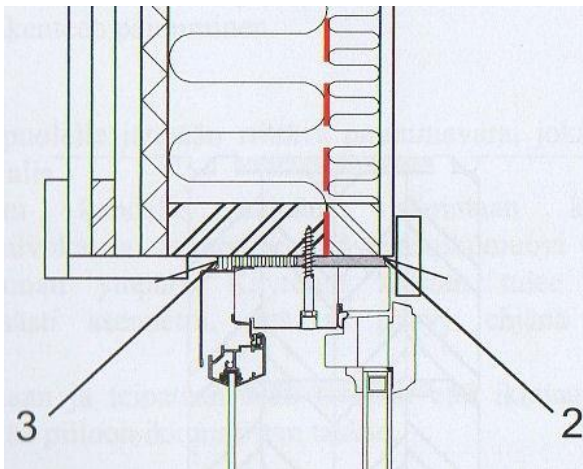
Tuulettuvia alapohjia toteutetaan myös puurakenteisina, jolloin tärkeässä roolissa on ryömintätilan tehokas tuuletus. Tällöin lattiarakenteen tuulensuojan tulee olla lämpöä eristävä, kosteutta kestävä sekä riittävän ilmatiivis, jotta ryömintätilan kylmä ilma ei pääse alapohjarakenteen lämmöneristekerrokseen. Tuulensuoja ei kuitenkaan saa toimia rakenteen höyrynsulkuna, koska se sijaitsee rakenteen kylmässä pinnassa. Tuulettuvalla puurakenteisella alapohjalla on hyvä olla erillinen ilmansulkukerros. Ilmansulkuna voidaan käyttää kalvomaista tuotetta tai esimerkiksi muovieristelevyä. (Aho - Korpi 2009, 22)



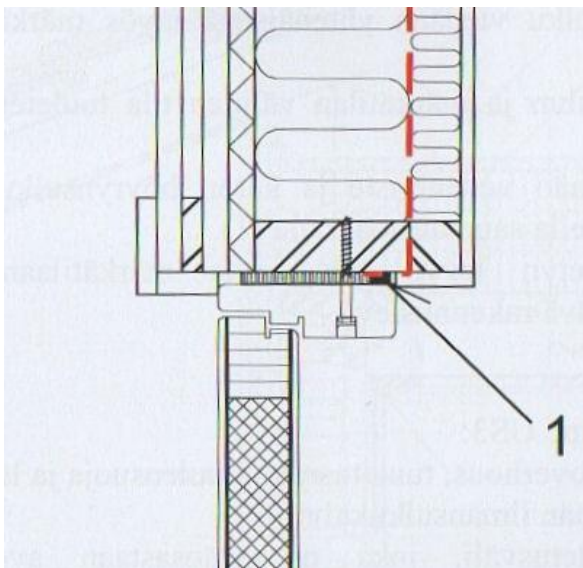
KUVA 9. Puurakenteisen tuulettuvan alapohjan ja ulkoseinän välinen liitos (Aho - Korpi 2009, 36)

3.1.5 Ikkunoiden, ovien ja läpivientien ilmatiiviin liitoksen toteutus

Ikkunat ja ovet voidaan tiivistää mineraalivillakaistalla, jolloin ilmatiiveys toteutetaan elastisella kittauksella sisäpinnassa. Toinen vaihtoehto on käyttää tiivistykseen polyuretaanivaahtoa. Ikkunoiden ja ovien tiivistyksessä on myös huomioitava ympäröivien rakenteiden ilmansulkukerrokset ja kerrosten limitettävyys, jotta vaipan yhtenäinen ilmansulku ei katkea. Lisäksi karmien tiivisteiden kunto ja toiminta tulee tarkastaa niiden asentamisen yhteydessä. (Aho - Korpi 2009, 81)

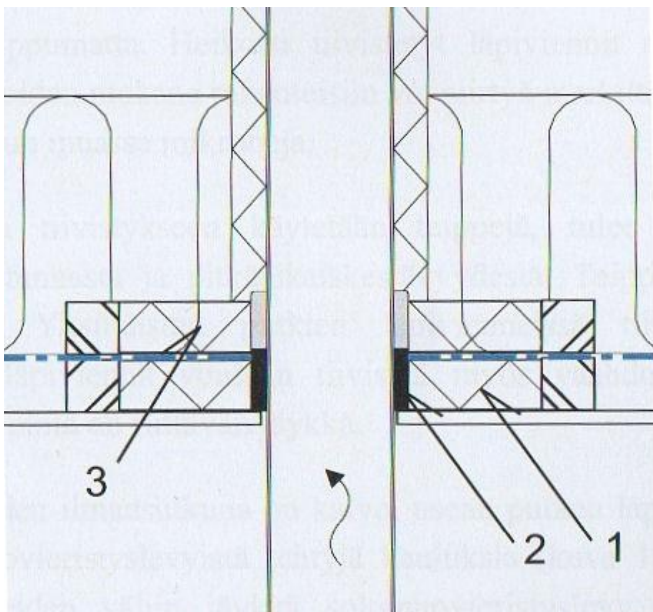


KUVA 11. Ikkunan tiivistäminen seinärakenteeseen (Aho & Korpi 2009, 81)



KUVA 12. Oven tiivistäminen seinärakenteeseen (Aho - Korpi 2009, 80)

Läpivientien tiivistämisessä käytetään usein teippejä. Teippejä käytettäessä tulee varmistua käytettyjen tuotteiden riittävästä tartunnasta ja pitkäaikaiskestävyydestä. Teippaus on aina pyrittävä tekemään tiivistä pintaa vasten. Läpivientejä on mahdollista tiivistää myös erillisillä läpivientikappaleilla ja -laipoilla. Lisäksi tiivistykseen voidaan käyttää vaahtoa tai elastista kittiä, kunhan ympäröivä pinta on riittävän jäykkä. Esimerkiksi puurankarakenteissa, joissa ilmansulkuna on kalvo, usean putken läpivientien tiivistäminen voidaan toteuttaa solumuovieristelevyistä tehdyllä kauluksilla (kuva 13). Läpivientikohtaan vaahdotetaan jäykkä solumuovieristelevy, johon läpivientiputken sen jälkeen tiivistetään jälleen vaahdolla. Ilmansulkukalvo tiivistetään kaulukseen joko teippaamalla tai puristamalla se kahden solumuovieristelevyn väliin. Savuhormien läpivientien tiivistämisessä tulee huomioida palomääräysten asettamat rajoitukset. (Aho - Korpi 2009, 84)



KUVA 13. Putkiläpivientien tiivistäminen solumuovieristekauluksen avulla (Aho - Korpi 2009, 86)

4 TIIVEYSMITTAUKSET

Tässä opinnäytetyössä esiteltävät tiiveysmittaukset tehtiin tutkimustyönä Oulun seudun ammattikorkeakoulun IEEB (Increasing Energy Efficiency in Buildings) -projektille. Mittauskohteiksi valittiin 1940-1990-luvuilla rakennettuja pientaloja. Lisäksi mitattiin kaksi täysin uutta pientalokohdetta Oulun Ritaharjussa. Mittaukset suoritettiin kolmen opiskelijan ryhmällä. Mittaustulokset dokumentoitiin IEEB-projektille luotuun tietokantaan. Itse projektin tavoite on kehittää teknisesti energiaa säästäviä asuntoja sekä ehdottaa ratkaisuja olemassa olevien rakennusten energian kulutuksen ja energiasuorituskyvyn vaihtelujen vähentämiseksi saatujen mittaustulosten pohjalta.

Tiiveysmittaukset toteutettiin teoriaosan luvun 2.4.1 esitellyn painekokeen mukaisesti. Painekoe suoritettiin sekä yli- että alipaineella, jotta tulokset olivat vertailukelpoisia muiden hankkeeseen tehtyjen mittaustulosten kanssa. Jokaisen kohteen ilmavirtaukset määritettiin viidellä tasaisin välein olevalla paine-erolla 20 pascalista aina 60 pascaliiin asti. Kohteiden ilmanvuotoluvuiksi ilmoitettiin yli- ja alipainemittausten keskiarvo.

Mittauslaitteistona käytettiin Minneapoliksen valmistamaa tiiveysmittauslaitteistoa sekä kannettavaa tietokonetta, johon oli asennettu mittausta automaattisesti ohjaava tietokoneohjelma. Tiiveysmittauslaitteisto on tarkemmin esitelty luvussa 2.4.2. Puhallin asennettiin kohteesta riippumatta aina ulko-oveen ovikehikon ja tiivistyskankaan avulla. Puhaltimen käyttöalue ja kapasiteetti olivat riittävän kattavat kaikkien mittausten suorittamiseen. Mittaustarkkuus pienilläkin ilmamäärillä pysyi hyvänä, koska käytössä oli Minneapoliksen valmistamia kuristusrenkaita, joita asennettiin puhallinaukkoon tarpeen mukaan (kuva 14).



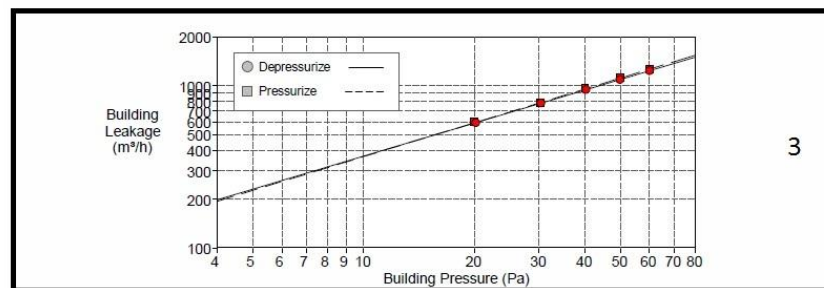
KUVA 14. Minneapolis tiiveysmittauslaitteisto käyttövalmiina

Mittaukset suoritettiin standardin SFS EN 13829 mukaisesti. Standardin mukaan luotettavan tiiveysmittauksen tekeminen edellyttää, että tuulen nopeus mittaushetkellä on alle 6 m/s. Jo ensimmäisten mittausten aikana todettiin, että laitteisto toimii luotettavasti vain, jos tuulen nopeus oli alle 5 m/s. Ainoat olosuhteista johtuvat mittausrvirheet, jotka mittauksissa syntyivät, johtuivat juuri tuulesta. Kun tuulen nopeus lähenteli lukemaa 5 m/s, oli vaikeaa saavuttaa tasaisin välein valittuja paine-eroja ja näin ollen lineaarista ilmanvuotokäyrää.

Tiiveysmittausten raportointi suoritettiin samalla tietokoneohjelmalla, jolla tiiveysmittauksiakin ohjattiin. Ohjelmalla luotiin tiiveysmittauspöytäkirja annettujen lähtötietojen ja saatujen mittaustulosten pohjalta (kuva 15). Ohjelma kirjasi raporttiin saadut mittaustulokset ja laski niiden pohjalta keskiarvot. Lisäksi ohjelma piirsi raporttiin kuvaajan ilmanvuotokäyrästä, josta ilmeni ilmamäärä paineeron suhteen ylipaineessa sekä alipaineessa.

	Depressurization	Pressurization	Average
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m³/h)	1094 (+/- 0.0 %)	1115 (+/- 0.1 %)	1104
n50: Air Changes per Hour (1/h)	4.29	4.37	4.33
w50: m³/(h*m² Floor Area)	10.72	10.93	10.83
q50: m³/(h*m² Surface Area)	3.52	3.59	3.55
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)	411.9 (+/- 0.1 %)	408.7 (+/- 0.6 %)	410.3
cm²/m² Surface Area	1.32	1.31	1.32
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)	214.1 (+/- 0.2 %)	209.2 (+/- 1.0 %)	211.6
cm²/m² Surface Area	0.69	0.67	0.68
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	77.2 (+/- 0.3 %)	74.9 (+/- 1.5 %)	2
Air Leakage Coefficient (CL)	78.0 (+/- 0.3 %)	74.5 (+/- 1.5 %)	
Exponent (n)	0.675 (+/- 0.001)	0.692 (+/- 0.004)	
Correlation Coefficient	1.00000	0.99995	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		

Inside Temperature:	23 °C	Volume:	255 m³	1
Outside Temperature:	8 °C	Surface Area:	311 m²	
Barometric Pressure:	100290 Pa	Floor Area:	102 m²	
Wind Class:	3 Gentle Breeze	Uncertainty of		
Building Wind Exposure:	Partly Exposed Building	Building Dimensions:	3 %	
Type of Heating:	Kaukolämpö	Year of Construction:	1976	
Type of Air Conditioning:	Painovoimainen			
Type of Ventilation:	None			



KUVA 15. Tiiveysmittauspöytäkirja: 1.lähtötiedot, 2.mittaustulokset ja 3.ilnavuotokäyrät

4.1 Kohteiden esittely

Tämän opinnäytetyön mittauskohteiksi valittiin 1980- ja 1990-luvuilla rakennettuja pientaloja. Kohteiksi pyrittiin löytämään alkuperäiskuntoisia rakennuksia, jotta mittaustuloksetkin vastaisivat kyseistä rakennusaikaa. Mittauksia markkinoitiin parissa tapahtumassa Oulussa. Varteenotettavia ilmoituksia asiakkailta tuli hyvä määrä, joista poimittiin mitattavat kohteet (taulukko 1). Kohteita mitattiin yhteensä 39, joista 11 oli 1980- ja 1990-luvuilla rakennettuja. Kaikki kohteet sijaitsivat Oulun alueella, joten etäisyydet kohteiden välillä pysyivät lyhyinä ja mittauksia pystyttiin suorittamaan useampia päivässä. 39 pientaloa saatiin mitattua syksyn 2012 aikana. Tämän jälkeen kohteet jaettiin rakennusajan mukaan ryhmiin ja aloitettiin raporttien teko. Kaikki raportit saatiin lähetettyä asiakkaille vuoden 2012 loppuun mennessä.

TAULUKKO 1. Kohdeluettelo

Kohde	Rak. Vuosi	Kerros- uku	m ³ / ilma- tilavuus	m ² / vaipan ala	Runko- materiaali	Ulko- verhous	Rak.tapa	Ala-pohja	Höyryn- /ilmansulku	Lämmitys- muoto	Ilmanvaihto
1	1983	2	395	402	hirsi	hirsi/puu	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + uu	painovoim.
2	1983	1	294	361	puu	tiili	paik			sähkö	koneel.poisto
3	1983	1,5	413	390	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	KL	painovoim.
4	1985	1	345	392	puu	tiili	elem	maanv.bet	muovi	KL	painovoim.
5	1985	1	320	397	puu	tiili				sähkö + uu	koneel.tulo-poisto
6	1987	2	462	467	puu	puu				sähkö	painovoim.
7	1987	1	505	510	puu	puu	paik	maanv.bet	muovi	KL	koneel.tulo-poisto
8	1989	1,5	466	394	puu/bet	puu/tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	koneel.tulo-poisto
9	1990	1,5	365	435	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	painovoim.
10	1991	2	352	396	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + uu	koneel.poisto
11	1991	1	575	551	puu	puu				sähkö + ölj	koneel.tulo-poisto

paik = paikallaan rakennettu kappaletavarasta

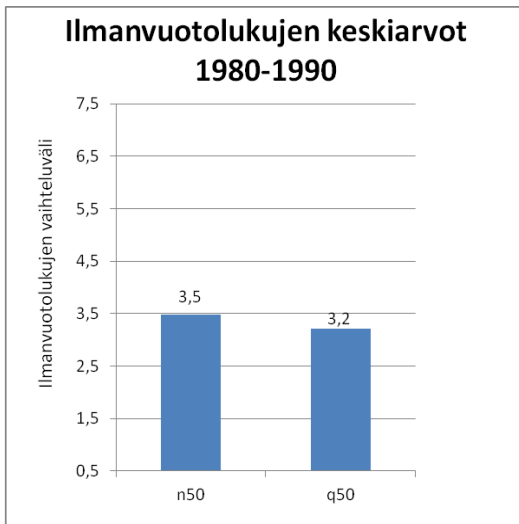
elem = elementtirakenne

KL = kaukolämpö

4.2 Mittaustulokset

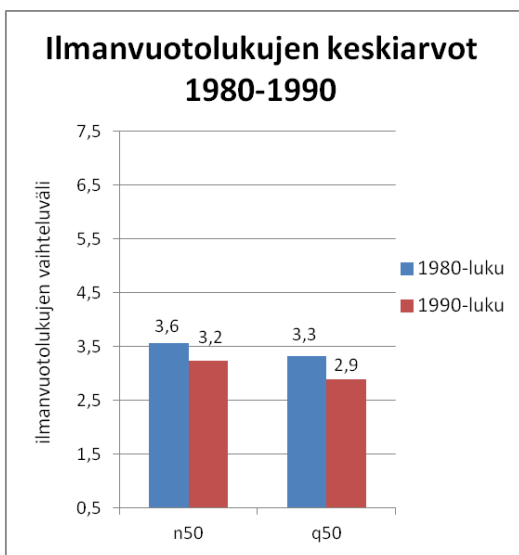
Mittaustuloksista olennaisin on saatu ilmanvuotoluku, jonka määrittäminen toimi lähtökohtana koko mittaukselle. Saadut ilmanvuotoluvut ovat ylipaineen ja alipaineen keskiarvoja. Mittaustulokset dokumentoitiin IEEB-projektille luotuun tietokantaan. Tietokanta toimii työkaluna tulosten vertailussa. Sillä pystytään rajaamaan eri tavoilla toteutetut rakennukset omiksi ryhmiä esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmän mukaan. Tietokannan lisäksi muodostettiin taulukko kaikista tuloksista, jotta saatiin muodostettua kuvaajat selkeyttämään vertailua.

Kaikkien yhdentoista pientalon ilmanvuotoluvut mahtuivat vertailu välille 0,5 - 7,5 (1/h) n_{50} -luvulla ja 0,6 - 6,6 [$m^3/(m^2 \cdot h)$] q_{50} -luvulla. Keskiarvoksi n_{50} -luvuilla saatiin 3,5 (1/h) ja q_{50} -luvuilla 3,2 [$m^3/(m^2 \cdot h)$] (kuva 16). Arvoista käy ilmi, että q_{50} -luku on keskiarvoisesti 0,3 yksikköä pienempi kuin n_{50} -luku. Tämä johtuu siitä, että suurin osa kohteista oli 1-kerroksisia pientaloja, joissa huonekorkeus on noin 2,5 metriä. Tällöin vaipan-ala on suurempi kuin tilavuus.



KUVA 16. Kaikkien kohteiden ilmanvuotolukujen keskiarvot

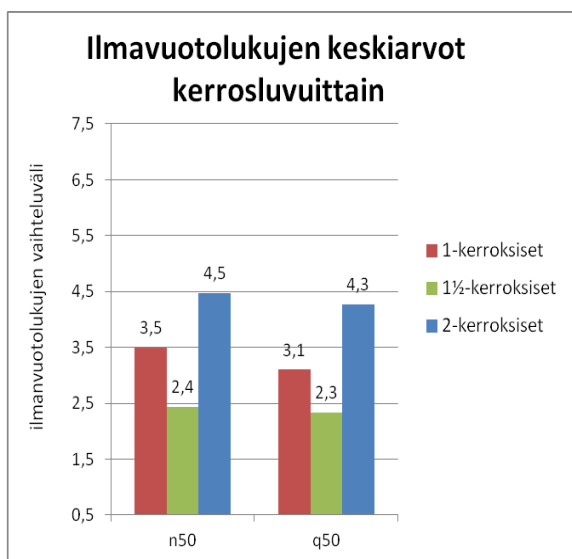
Seuraavaksi otettiin vertailun perusteeksi rakennus vuosikymmen eli eroteltiin ilmanvuotoluvut ja niiden keskiarvot 1980-luvulle ja 1990-luvulle (kuva 17). 1980-luvulla rakennettujen pientalojen n₅₀-luvun keskiarvo saatiin 3,6 (1/h) ja q₅₀-luvun 3,3 [m³/(m²*h)]. 1990-luvun pientaloilla vastaavat luvut olivat 3,2 (1/h) ja 2,9 [m³/(m²*h)]. Tästä käy ilmi, että n₅₀-luvun ja q₅₀-luvun välinen ero pysyy samana vuosikymmenistä riippumatta (0,3 yksikköä). Vuosikymmenten välinen ero taas asettui 0,4 yksikköön 1990-luvun eduksi.



KUVA 17. Ilmanvuotolukujen vertailu vuosikymmenittäin

Vuosikymmenten välinen vertailu ei ole täysin luotettava, koska suurin osa kohteista on rakennettu 1980-luvulla. Mitatuista kohteista vain kolme oli rakennettu 1990-luvulla ja nekin vuosikymmenen alkupuolella. Luotettavaa vertailua varten mitattavia kohteita pitäisi saada lisää varsinkin 1990-luvun lopulta. Mutta tämä vertailu toimii jo suuntaa antavana, koska eroja vuosikymmenten välille saatiin jo näilläkin kohdemäärillä.

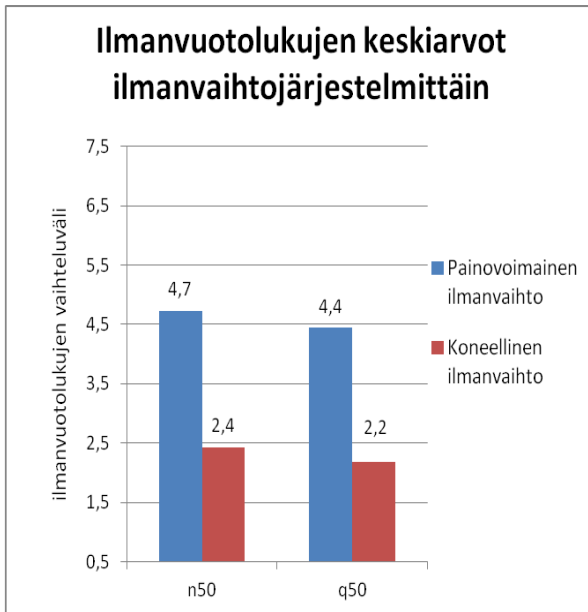
Mittaustuloksia vertailtiin myös rakennusten kerrosluvun mukaan (kuva 18). Tämä vertailu suoritettiin kaikkien kohteiden kesken, koska 90-luvun kohteita oli vain yksi jokaista vertailtavaa kerroslukua kohti. Kohteista suurin osa oli 1-kerroksisia, mutta joukossa oli myös muutama 1½-kerroksinen sekä 2-kerroksinen kohde. Tulosten perusteella ilmatiiveys oli paras 1½-kerroksissa taloissa. 2-kerroksisten talojen tiiveys oli keskimääräisesti huonoin. Tämä johtuu siitä, että näissä taloissa on eniten eri rakenteiden liitoksia, jotka ovat vuotoherkimpiä kohtia rakennuksissa. 1-kerroksiset pientalot jäivät vertailussa näiden kahden muun väliin.



KUVA 18. Ilmanvuotolukujen vertailu rakennusten kerrosluvun mukaan

Viimeinen ilmanvuotolukujen vertailu suoritettiin rakennusten ilmanvaihtojärjestelmien perusteella (kuva 19). Vertailu tehtiin painovoimaisen ja koneellisesti hoidetun ilmanvaihdon välillä. Tämä vertailu osoittautui eniten eroa tekeväksi vertailuksi. Pientaloille, joissa oli painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, saatiin

ilmanvuotoluvuiksi 2,3 yksikköä huonompi tulos kuin koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän omaaville pientaloille. Tästä voisi päätellä sen, että kun ilmanvaihto on mietitty huolella, luultavasti myös rakenteiden ilmatiiveyteen on kiinnitetty enemmän huomiota.



KUVA 19. Ilmanvuotolukujen vertailu rakennusten ilmanvaihtojärjestelmän perusteella

Rakenteellista vertailua ei suoritettu, koska kohteiden rakenteissa ei juurikaan ollut eroavaisuuksia. Lähes kaikki pientalot olivat paikallaan rakennettuja ja puurunkoisia. Alapohjana toimi maanvarainen betonilaatta sekä ilman- ja höyrynsulkuna oli muovikalvo.

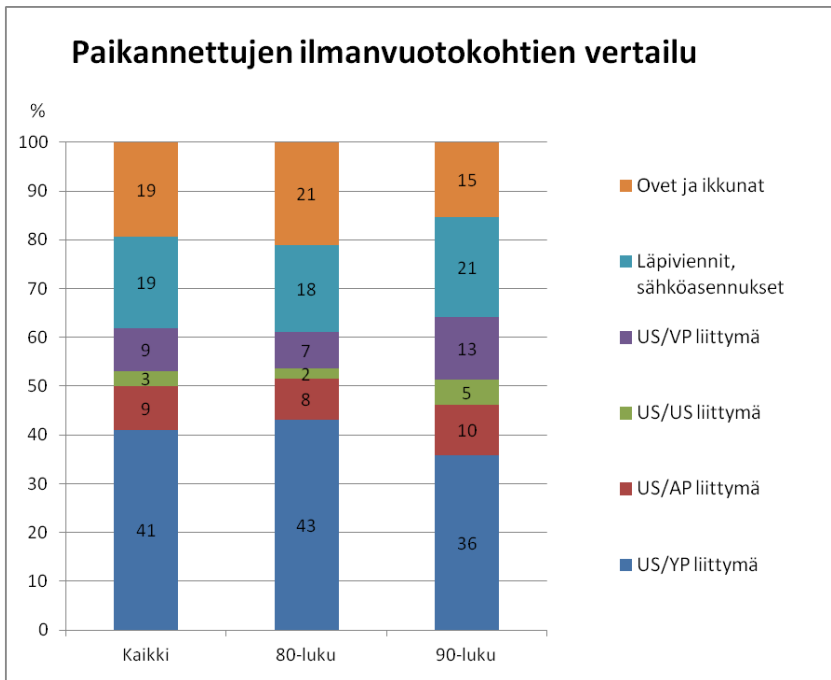
4.3 Vuotokohtien paikannus

Tiiveysmittausten yhteydessä jokaisessa pientalossa suoritettiin myös lämpökuvauus lämpökameralla. Lämpökuvauksen tarkoituksena oli paikallistaa mahdolliset ilmanvuotokohdat. Kuvaukset tehtiin 50 pascalin alipaineella, jotta vuotokohdat näkyisivät paremmin kameralla. Lämpökamerana kuvauksissa toimi FLIR B400 Western.

Kun tiiveysmittaus alipaineella oli suoritettu ja ilmapuotokäyrät muodostettu, säädettiin puhallin pitämään 50 pascalin alipainetta yllä kohteessa. Rakenteiden annettiin jäähtyä noin 15 minuuttia ennen kuvauksen aloittamista. Lämpökameraan syötettiin lähtötietoina vallitseva suhteellinen kosteus, pintojen emissiivisyys sekä kuvaus etäisyys. Emissiivisyys pidettiin joka kohteessa vakioarvona 0,95. Myös etäisyys, jolta pintoja kuvattiin, pysyi samana (2,5 metriä).

Kun pinnat olivat jäähtyneet, aloitettiin lämpökuvaukset. Rakennusten jokainen tiiveysmittauksessa mukana oleva tila kierrettiin kameran kanssa ja mahdolliset ilmapuotokohdat kuvattiin kameralla. Kun kuva oli otettu, syötettiin kuvaan ääniraita, jossa ilmoitettiin kuvanottoaika sekä ilmapuotokohdan sijainti. Kamera otti yhtäaikaista normaalin valokuvan sekä lämpökuvan kuvattavasta pinnasta, mikä helpotti huomattavasti kuvien käsittelyä jälkeempään.

Kaikkien kuvattujen kohteiden kesken tehtiin vertailu paikannettujen ilmanvuotokohtien sijainneista (kuva 20). Vertailusta käy ilmi, että suurin osa vuotokohdista sijaitsi ulkoseinän ja yläpohjan liitospaikoissa. Peräti 41 % kaikista paikannetuista vuotokohdista sijaitsi ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessa. Seuraavana ilmanvuotokohtana tulivat läpiviennit sekä ovet ja ikkunat. Noin 20 % ilmanvuotokohdista sijaitsi läpiviennin kohdalla ja toiset 20 % oven tai ikkunan kohdalla. Muita ilmanvuotokohtia olivat ulkoseinän ja alapohjan liitos, ulkoseinien nurkat sekä ulkoseinän ja välipohjan välinen liitospaikka. Vuosikymmenten välillä ei löytynyt merkittäviä eroja vuotokohtien sijainneissa.



KUVA 20. Lämpökuvauksella paikannettujen ilmanvuotokohtien vertailu

Asiakkaille tehtiin tiiveysmittauspöytäkirjan lisäksi lämpökuvausraportti, jossa esiteltiin tarkemmin löydetyt ilmanvuotokohtat. Kuvat käsiteltiin FLIR Reporter -ohjelmalla. Ohjelmalla valittiin kuvat, jonka jälkeen kuvat ladattiin valmiiseen raporttipohjaan. Raporttipohjan ensimmäisellä sivulla esiteltiin käytetyt mittausparametrit sekä vallitsevat kuvausolosuhteet (kuva 21). Lisäksi näytettiin valokuvat kohteesta ja tiiveysmittauslaitteistosta.

Kohdetiedot:

Kuvauspaikka: **Kuvauspäivämäärä: 9.11.2012**

Mittauskalusto

Valokuva kohteesta



Etäisyys (Lämpökuvasta)	2.5 m	Heijastuva lämpötila (LHei lämpökuvasta)	26.8 °C
Kameratyyppi	FLIR B400 _ Western	Emissiivisyys (Lämpökuvasta)	0.95

Ulkoilman olosuhteet

Sisäilman olosuhteet

Tuulen nopeus/tuulen suunta	5 m/s	Sisäilman suhteellinen kosteus	38.0 %
Pilvisyys	Puolipilvinen	Paine-ero rakenteen yli (negatiivinen = alipaine sisällä)	-50 Pa
Ulkoilman lämpötila	-1 °C	Sisäilman lämpötila	20.0 °C

Puhallin asennettiin kuvan mukaisesti ulko-oveen. Yllä olevat mittausparametrit pysyivät samoina koko kuvauksen ajan.

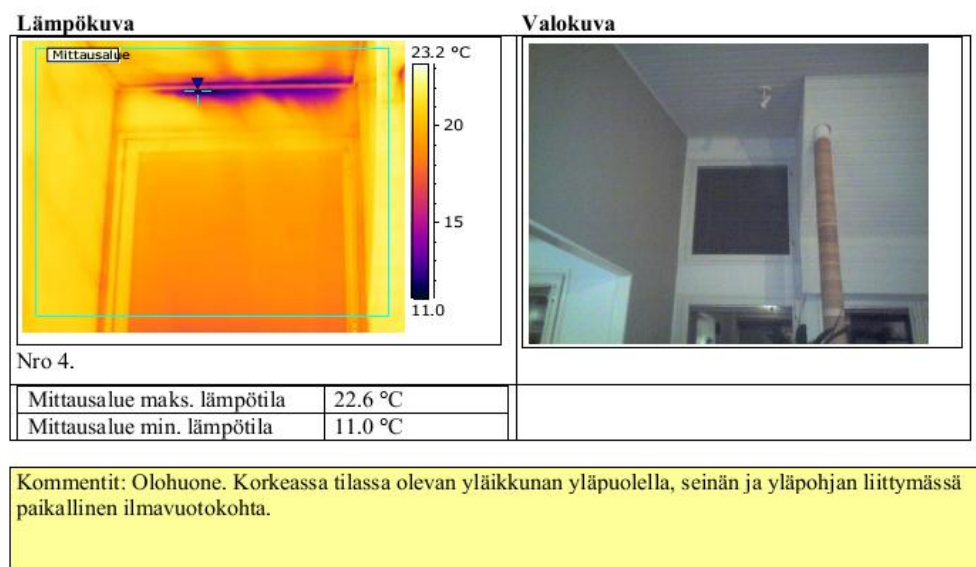
Jokaisen kuvaparin alla näkyvät kuvan maksimi ja minimi lämpötilat. Kommenttikentästä ilmenee kuvaus kohta.

KUVA 21. Lämpökuvausraportin kansilehti

Raportin loppuilla sivuilla kuvattiin paikannettuja vuotokohtia. Yhdellä sivulla oli kaksi kuvaparia, normaali valokuva ja lämpökuva ilmavuotokohdasta. Kuvien alle kirjoitettiin lyhyt selvitys ilmanvuotokohdan sijainnista ja laadusta. Seuraavissa kohdissa käydään läpi yleisimmät ilmanvuotokohdat. Jokaisesta ilmanvuotokohdasta näytetään yksi esimerkki tapaus.

4.3.1 Ulkoseinän ja yläpohjan liittymä

Ulkoseinän ja yläpohjan liittymä oli yleisin ilmanvuotokohta. Noin 40 % kaikista paikannetuista vuotokohdista sijaitsi juuri yläpohjan ja seinän liitoskohdassa.

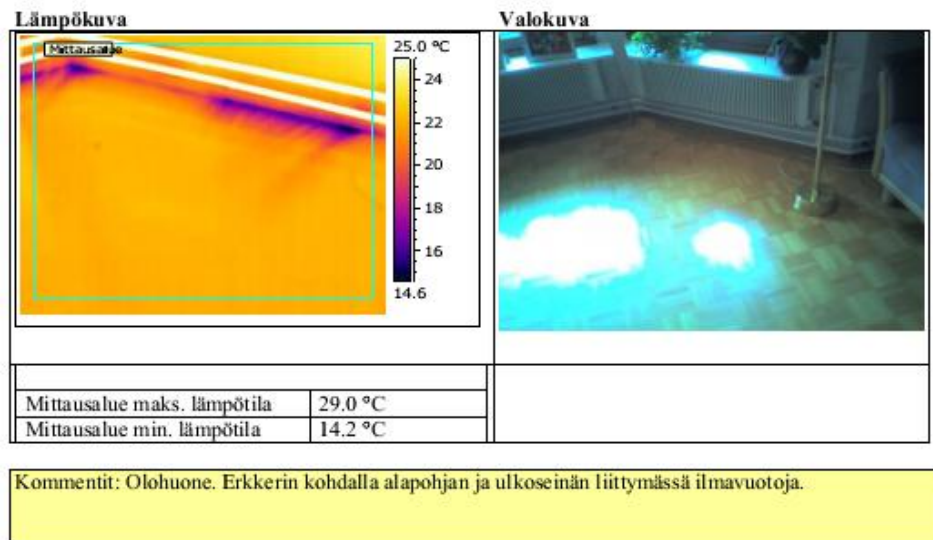


KUVA 22. Ilmanvuotokohta ulkoseinän ja yläpohjan liittymässä

Kuvan perusteella yläpohjan ja ulkoseinän ilmansulkukalvojen limitys ja tiivistys on tehty huolimattomasti. Lämpötilaero kylmimmän ja lämpimimmän pinnan välillä on yli 10 astetta. Ulkolämpötila kuvaushetkellä oli 1 °C.

4.3.2 Ulkoseinän ja alapohjan liittymä

Ulkoseinän ja alapohjan välisiä ilmanvuotokohtia paikannettiin noin 10 % kaikista ilmanvuotokohdista. Liittymä oli pääsääntöisesti toteutettu ilmatiiviisti. Ulkoseinän ja alapohjan liittymän korjaaminen ilmatiiviiksi jälkeinpäin on työlästä. Ulkoseinän ilmansulkukalvon ulottaminen maanvaraisen betonilaatan alle vaatisi alapohjan reunan aukaisua ja uudelleen umpeen valamista. Liittymää on myös mahdollista yrittää tiivistää elastisella saumamassalla, jolloin selvittää huomattavasti pienemmällä remontilla.

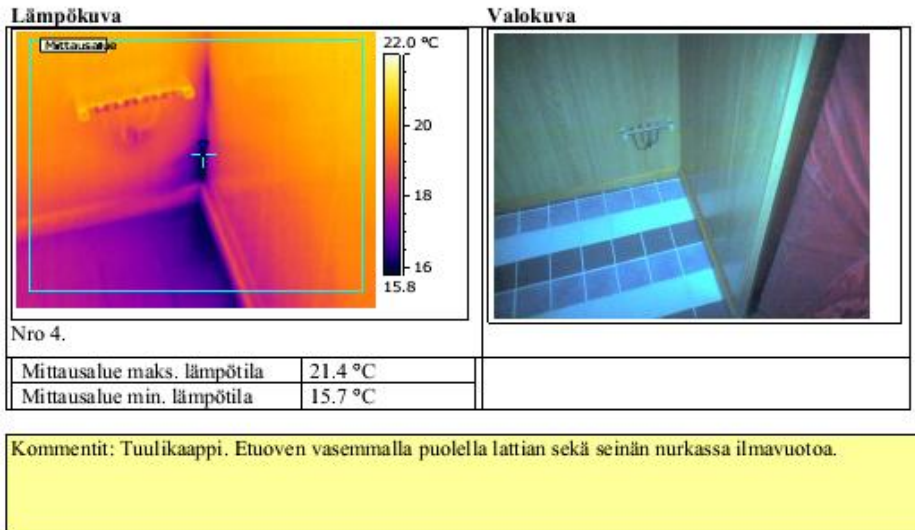


KUVA 23. Ilmanvuotokohta ulkoseinän ja alapohjan liittymässä

Kuvan ilmanvuotokohtaa tuskin huomaa normaalissa asumistilanteessa, koska ulkoseinän alareunassa kiertää vesipatteriputket. Kuvaushetkellä ulkoilman lämpötila oli 8 °C. Kuvassa kylmin pinta eli alapohjan seinä ulkoseinän liittymä oli minimissään 14,2 °C eli vain 6 astetta ulkoilmaa lämpimämpi.

4.3.3 Ulkoseinien liittymä

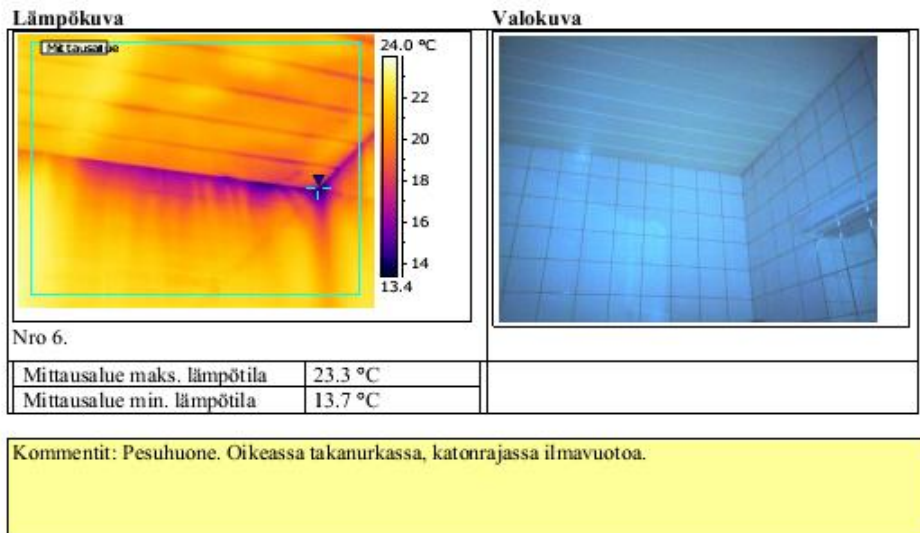
Kahden ulkoseinän välisestä liittymästä eli ulkoseinien nurkista löytyi vähiten ilmanvuotokohtia. Näitä ilmanvuotokohtia paikannettiin vain muutama prosentti kaikista ilmanvuotokohdista. Alla olevassa kuvassa on esimerkki ulkoseinien välisestä ilmanvuotokohdasta. Ulkolämpötila kuvaushetkellä oli 4 °C. Kuvassa ilmanvuotokohdan minimi lämpötila oli 15,7 °C, joten vuotokohta on melko olematon. Ilmanvuotokohdan korjaaminen ei ole lämpökuvan mukaan perusteltua.



KUVA 24. Ilmanvuotokohta ulkoseinien liittymässä

4.3.4 Ulkoseinän ja välipohjan liittymä

Ulkoseinän ja välipohjan välisiä ilmanvuotokohtia ilmeni vain kaksi kerroksissa rakennuksissa. Prosentti osuus kaikista ilmanvuotokohdista oli noin 20 %. Tämä jo kertoo sen, että osuus olisi ollut luultavasti suurempi, jos kaikki kohteet olisivat olleet kaksikerroksisia pientaloja.



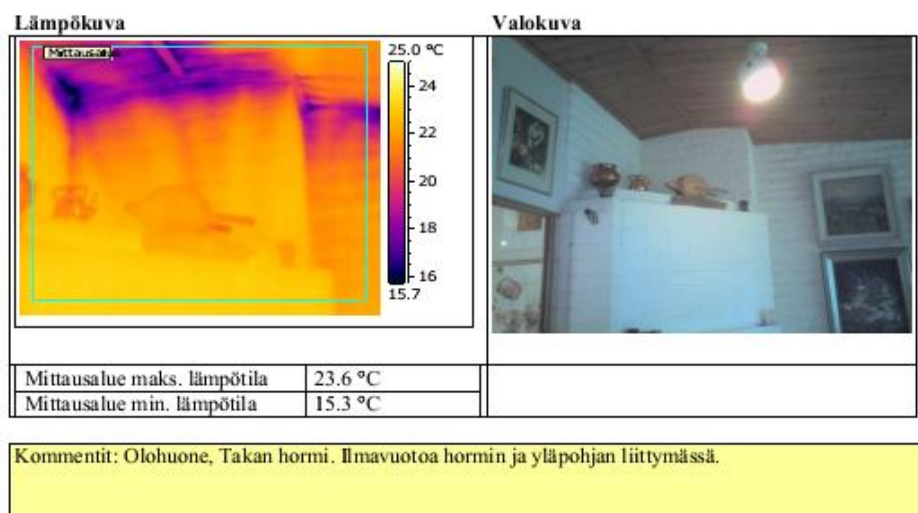
KUVA 25. Ilmanvuotokohta ulkoseinän ja välipohjan liittymässä

Kuva on otettu pesuhuoneesta. Ulkolämpötila kuvaushetkellä oli 2 °C. Lämpöerot ulkolämpötilaan nähden pysyvät melko maltillisina, joten suuresta ilma-

vuodosta ei ole kyse. Pesutiloissa kosteus kuitenkin nousee hetkellisesti suuremmaksi muihin tiloihin nähden, joten ilmatiiveyteen tulisi kiinnittää suurempaa huomiota. Tällä estetään kosteuden kulkeutuminen rakenteisiin.

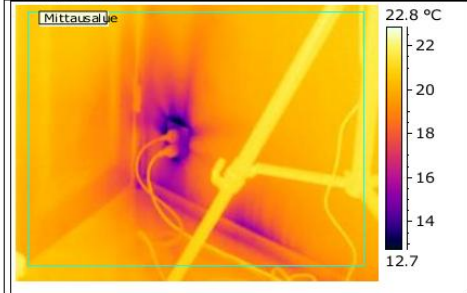
4.3.5 Lämpiviennit ja sähköasennukset

Tulisijojen hormien läpiviennit yläpohjassa ja sähköasiat ulkoseinillä ovat riskialttiita ilmanvuotokohtia. Yläpohjan ilmansulkukalvon tiivistäminen läpiviennin kohdalla oli monessa kohteessa joko puutteellinen tai tiivistykseen oli käytetty huonolaatuisia materiaaleja. Ulkoseinille asennetut pistorasiat olivat myös monessa kohteessa ilmanvuotokohtia. Luultavasti rasian asennuksen yhteydessä höyrinsulkumuovi oli puhkottu, eikä kalvoa oltu korjattu tai tiivistetty asennuksen jälkeen. Myös kattovalaisimien kohdalla näkyi ilmapuotoa muutamissa kohteissa. Lämpivientien ja sähköasennusten kohdilta paikannettuja ilmanvuotokohtia oli noin 20 % kaikista löydetyistä ilmanvuotokohdista.



KUVA 26. Ilmanvuotokohta tulisijan hormin läpiviennissä yläpohjassa

Ulkolämpötila kuvaushetkellä oli 8 °C ja kuvan minimi pintalämpötila oli 15,3 °C. Tulisijan hormin läpiviennin tiivistys on toteutettu huolimattomasti.

Lämpökuv**Valokuva**

Nro 3.

Mittausalue maks. lämpötila	22.1 °C
Mittausalue min. lämpötila	12.6 °C

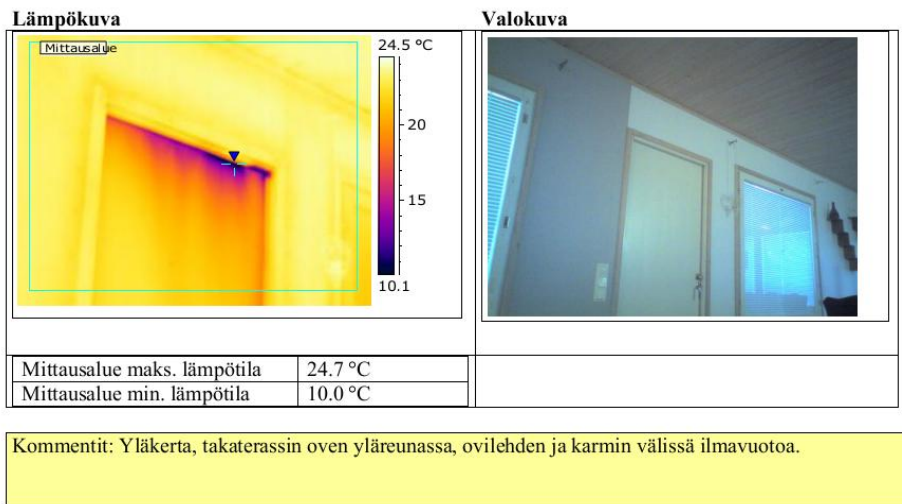
Kommentit: Pukuhuone. Pistorasian kohdalla ulkoseinässä ilmavuotoa.

KUVA 27. Ilmanvuotoa sähkörasian kohdalla ulkoseinässä

Sähkörasian asennuksen yhteydessä on ilmeisesti puhkottu ulkoseinän ilmansulkukalvo, jolloin pistorasian ympärillä on ilmavuotoa. Kuvasta näkee lämpötilaerojen olevan noin 10 astetta. Kuvaushetkellä ulkolämpötila oli 2 °C.

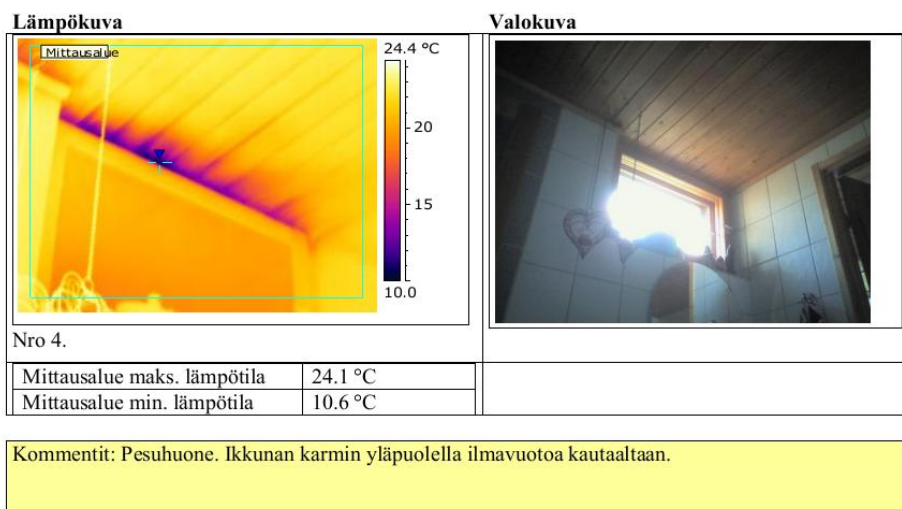
4.3.6 Ovet ja ikkunat

Ovien ja ikkunoiden kohdalla ilmavuotoja havaittiin sekä karmien tiivisteissä että aukkojen tiivistyksessä ulkoseiniin. Edullisemmaksi vuotokehien korjaamiseksi tulisi luultavasti karmien tiivisteiden väliset ilmanvuotokohdat, jolloin vuodot saataisiin paikattua pelkällä tiivisteiden uusimisella. Ikkuna- tai oviaukon ja seinärungon välinen tiivistäminen vaatisi todennäköisesti rakenteiden avaamisen. Ovien ja ikkunoiden kohdalla havaittuja ilmanvuotoaikohtia oli noin 20 % kaikista paikannetuista ilmanvuotoaikohtista.



KUVA 28. Ilmanvuotokohta ovilehden ja karmin välissä

Kuvan ilmanvuoto on helppo korjata tiivisteiden uusimisella. Vuoto on melko huomattava jo lämpötilaerojenkin puolesta. Kuvaushetkellä ulkoilmanlämpötila lähenteli nollaa.



KUVA 29. Ilmanvuotokohta ikkunan karmin yläpuolella

Kuvasta on vaikea tulkita täydellä varmuudella, tuleeeko ilmavuoto ikkunan karmin tiivisteiden välistä vai karmin ja seinärungon välistä. Vuoto on kuitenkin huomattavaa ja sitä esiintyy koko karmin leveydeltä. Lämpötilat erot pintojen välillä ovat melko suuret. Ulkolämpötila kuvaushetkellä oli 1 °C.

5 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus tutustua 1980- ja 1990-luvulla rakennettujen pientalojen ilmatiiveyteen tiiveysmittausten sekä lämpökamerakuvausten avulla. Pääroolissa oli saatujen tulosten vertailu eikä niinkään tulosten jälkeiset korjaus ehdotukset, koska mittaukset toteutettiin tutkimustyönä Oulun seudun ammattikorkeakoulun IEEB-projektille. Tuloksia voitiin vertailla projektille luodun tietokannan avulla, johon kaikki mittaustulokset dokumentoitiin. Lisäksi vertailua tehtiin opinnäytetyöhön tehdyn taulukon avulla.

Kaikkien mitattujen yhdentoista pientalon ilmanvuotoluvut mahtuivat vertailuvälille 0,5 - 7,5 (1/h) n_{50} -luvulla ja 0,6 - 6,6 [$m^3/(m^2 \cdot h)$] q_{50} -luvulla. Keskiarvoksi n_{50} -luvuilla saatiin 3,5 (1/h) ja q_{50} -luvuilla 3,2 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. Kun kohteet vielä jaettiin kerrosluvun perusteella kahteen ryhmään, 1-kerroksiset ja 1,5 - 2-kerroksiset pientalot, saatiin vertailukelpoiset tulokset Sauli Paloniityn vuonna 2012 ilmestyneen Rakennusten tiiveysmittaukset kirjaa varten kerättyjen tiiveysmittaustulosten kanssa. 1-kerroksisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvoiksi saatiin n_{50} -luvuilla 3,5 (1/h) ja q_{50} -luvuilla 3,1 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. Paloniityn kirjassa vastaavat luvut ennen vuotta 1999 rakennetuilla 1-kerroksisilla pientaloilla olivat 7,0 (1/h) ja 9,0 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. 1,5 - 2-kerroksisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvoiksi taas saatiin n_{50} -luvuilla 3,5 (1/h) ja q_{50} -luvuilla 3,3 [$m^3/(m^2 \cdot h)$]. Vastaavat luvut Paloniityn kirjasta olivat 8,0 (1/h) ja 8,5 [$m^3/(m^2 \cdot h)$].

Ympäristöministeriön asetuksessa "Rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä" on esitetty taulukko rakennusvaipan ilmanvuotoluvuista eri aikakausille. Jos rakennuksen ilmanvuotolukua ei ole selvitetty mittaamalla, suunnitelmista tai ajankohtaisista rakennuksen asiakirjoista, tulee rakennuksen ilmanvuotolukuna käyttää taulukon mukaista arvoa. Tämän taulukon mukaan 1980- ja 1990-luvuilla rakennetuille pientaloille ilmanvuotolukuna käytetään arvoa 6,0 (1/h). Vertailuarvona lukema on lähes puolet suurempi kuin mitattujen pientalojen keskiarvo. Kohteiden mittaaminen ja ilmanvuotoluvun selvittäminen osoittautuivat tämän perusteella kannattaviksi.

Tulosten vertailusta käy ilmi, että opinnäytetyöhön mitattujen kohteiden tulokset ovat huomattavasti parempia kuin Paloniityn kirjaan kerätyt tulokset ja puolet ympäristöministeriön asetuksen mukaisesta ilmanvuotoluvusta. Paloniityn kirjassa mittauskohteiden ikähaitari oli suurempi (1940 - 1999), mikä selittänee osaltaan suuren eron. Kun otetaan vertailuarvoiksi Paloniityn kirjasta vastaavat mittauskohteet 2000-luvulta, ovat tulokset huomattavasti lähempänä toisiaan. Myös Tampereella oli tehty vastaavanlaisia kenttämittauksia teknillisen yliopiston ja teknillisen korkeakoulun yhteishankkeena vuosina 2005 - 2008. Tampereella ilmanvuotoluvuiksi puurunkoisille pientaloille oli saatu 3,9 (1/h) ja 3,9 [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]. Nämä tulokset olivat keskenään samassa linjassa opinnäytetyöhön tehtyjen mittaustulosten kanssa.

Vuotokohtien paikannus toteutettiin lämpökamerakuvauksella tiiveysmittausten yhteydessä. Saatujen tulosten perusteella todettiin, että ulkoseinän ja yläpohjan liittymä oli yleisin ilmanvuotokohta. Kaikista ilmanvuotokohdista peräti 41 % sijaitsi ulkoseinän ja yläpohjan liittymässä. Seuraavana tulivat ovet ja ikkunat sekä läpiviennit ja sähköasennukset. Molemmat ryhmät edustivat 20 % kaikista ilmanvuotokohdista. Jaetulla kolmannella sijalla olivat ulkoseinän ja välipohjan liittymät sekä ulkoseinän ja alapohjan liittymät. Molemmissa liittymissä ilmeni 9 % ilmavuotoja kaikkiin paikannettuihin ilmanvuotokohtiin verrattuna. Vähiten ilmavuotoja paikannettiin ulkoseinien keskinäisissä liittymissä eli ulkoseinien nurkissa. Näitä vuotokohtia oli vain 3 % kaikista ilmanvuotokohdista.

Vertailuksi ilmanvuotokohtien paikantamiselle voidaan ottaa Tampereen teknillisen yliopiston ja teknillisen korkeakoulun vuonna 2009 tekemä yhteishanke, jossa oli tehty samantyyppinen ilmanvuotokohtien paikkajakauma. Tampereen tutkimuksessa ulkoseinän ja yläpohjanliittymä keräsi 37 % kaikista paikannetuista ilmanvuotokohdista, ja se oli siis yleisin ilmanvuotokohta myös Tampereella. Ikkunat ja ovet olivat seuraavana 31 %:lla, mikä eroaa 11 prosenttia tämän opinnäytetyön tuloksesta. Ero johtuu siitä, että ilmavuotoja läpivienneissä ja sähköasennuksissa oli vain 8 % kaikista paikannetuista ilmanvuotokohdista, kun vastaava luku opinnäytetyön tuloksissa oli 20 %. Loput vertailussa olevat ilmanvuotokohdat jakautuivat molemmissa tutkimuksissa lähes samoihin arvoihin.

Saadut mittaustulokset ja ilmanvuotokohtien paikkajakauma olivat samansuuntaisia aikaisemmin toteutettujen tutkimusten kanssa. Vertailua vaikeutti hieman ikäjakauma, koska opinnäytetyötä varten valitut kohteet mahtuivat 20 vuoden ikähaitariin, kun taas aikaisemmin toteutetuissa tutkimuksissa kohteiden ikähaitari oli suurempi tai vertailtavat kohteet olivat iältään huomattavasti uudempia. Itse mittauksissa ongelmia ei juurikaan ilmennyt. Muutamissa kohteissa mittaushetkellä 5 m/s puhaltanut tuuli hieman vaikeutti luotettavien mittaustulosten saamista, mutta loppujen lopuksi kaikki kohteet saatiin mitattua tulokset raportoitua.

Opinnäytetyöhön tehdyt ilmatiiveystutkimukset olivat kokonaisuutena erittäin mielenkiintoinen projekti. Tutkimusten avulla saatiin hyvä pohjakoulutus tiiveysmittauksen ja lämpökamerakuvauksen suorittamisesta sekä laaja-alaista tietoa pientalojen ilmatiiveyden kehittymisestä. Asiakkaille raportoidut tutkimustulokset antoivat yleiskuvan rakennusten ilmatiiveydestä sekä lämpöteknisestä toimivuudesta. Koska tutkimukset suoritettiin oppilastöinä, eivät tulokset toimi virallisina dokumentteina tai korjausperusteina. Virallinen ja tarkempi tarkastelu olisi vaatinut koulutetun ja sertifikaatin omaavan henkilön läsnäolon, jonka valvonnassa tutkimukset olisi suoritettu. Lisäksi rakenteita olisi luultavasti jouduttu avaamaan, jotta rakenteen todellinen kunto olisi selvinnyt ja korjauskehotus olisi näin ollen ollut perusteltua.

LÄHTEET

Paloniitty, Sauli 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.

RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Helsinki: Rakennustieto.

D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Tiitto, Tiina – Ylikärppä, Matti 1989. Pientalokirja 1990. Helsinki: Oy Partek Ab.

Aho, Hanna – Korpi, Minna 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.

Vinha, Juha – Korpi, Minna – Kalamees, Targo – Jokisalo, Juha – Eskola, Lari – Palonen, Jari – Kurnitski, Jarek – Salminen, Mikko – Salminen, Kati – Keto, Matias 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Laskentaliite ympäristöministeriön asetuksen "rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä". Saatavissa:

[http://www.ym.fi/download/noname/%7BE6B413C1-DAB5-4433-9D0F-](http://www.ym.fi/download/noname/%7BE6B413C1-DAB5-4433-9D0F-F4C81AC6EF00%7D/31398)

[F4C81AC6EF00%7D/31398](http://www.ym.fi/download/noname/%7BE6B413C1-DAB5-4433-9D0F-F4C81AC6EF00%7D/31398). Hakupäivä 7.4.2013.

LIITTEET

Liite 1. Kohteiden tiedot

Kohde	Rak. Vuosi	Kerros- luku	n50	q50	m3 / ilma- tilavuus	m2 / vaipan ala	Runko- materiaali	Ulko- verhous	Rak.tapa	Ala-pohja	Höyryn- /ilmansulku	Lämmitys- muoto	Ilmanvaihto
1	1983	2	4,8	4,7	395	402	hirsi	hirsi/puu	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + uuni	painovoim.
2	1983	1	2,7	2,2	294	361	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	koneel.poisto
3	1983	1,5	3,5	3,7	413	390	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	KL	painovoim.
4	1985	1	7,5	6,6	345	392	puu	tiili	elem	maanv.bet	muovi	KL	painovoim.
5	1985	1	3,4	2,7	320	397	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + uuni	koneel.tulo-poisto
6	1987	2	4,5	4,5	462	467	puu	puu	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	painovoim.
7	1987	1	1,6	1,6	505	510	puu	puu	paik	maanv.bet	muovi	KL	koneel.tulo-poisto
8	1989	1,5	0,5	0,6	466	394	puu/bet	puu/tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	koneel.tulo-poisto
9	1990	1,5	3,3	2,7	365	435	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö	painovoim.
10	1991	2	4,1	3,6	352	396	puu	tiili	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + uuni	koneel.poisto
11	1991	1	2,3	2,4	575	551	puu	puu	paik	maanv.bet	muovi	sähkö + öljy	koneel.tulo-poisto
Keskiarvo:			3,5	3,2									

paik = paikallaan rakennettu kappaletavarasta

elem = elementtirakenne

KL = kaukolämpö

