



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mika Korpi

# KERROSTALON TIIVIYSMITTAUS

Ylempi AMK-tutkinto  
Tekniikka ja liikenne  
2011

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mika Korpi
Opinnäytetyön nimi	Kerrostalon tiiviysmittaus
Vuosi	2011
Kieli	suomi
Sivumäärä	52 + 26 liitettä
Ohjaaja	Tapani Hahtokari

---

Opinnäytetyössä toteutettiin kerrostalon tiiviysmittaus sekä huoneisto-, että talokohtaisena mittauksena. Huoneistokohtaisia mittauksia kohdetalossa toteutettiin kaiken kaikkiaan 20 kappaletta, mikä on 39 % talon 51 huoneistosta. Talokohtaisessa mittauksessa tutkimus suoritettiin siten, että koko rakennuksen ulkovaippa saatiin mukaan tutkimusalueeseen.

Työssä on myös esitelty kohdetalon rakennedetaljit ja näissä huomio on kiinnittynyt tiiviysasioihin. Erilaisia rakennedetaljeja rakennuksen ulkovaipassa on kahdeksaa erilaista, joten rakennus luokitellaan sekarakenteiseksi rakennukseksi.

Ilmavuotoluku voidaan esittää joko ilmavuotolukuna rakennuksen tilavuuteen nähden  $n_{50}$  – lukuna tai ilmavuotolukuna rakennuksen ulkovaipan alaan nähden  $q_{50}$  –lukuna. Näiden kahden laskentatavan vertailu oli yhtenä keskeisenä tavoitteena tutkimusprosessissa.

Suurten rakennusten ilmavuotoluvusta on muissa tutkimuksissa todettu, että  $q_{50}$  – luku sopii paremmin käytettäväksi, kun rakennuksen tilavuus kasvaa yli  $4000 \text{ m}^3$ . Samansuuntaiseen tulokseen päädyttiin myös tässä tutkimuksessa.

## ABSTRACT

Author	Mika Korpi
Title	Air Tightness Measurement of an Apartment Building
Year	2011
Language	Finnish
Pages	52 + 26 Appendices
Name of Supervisor	Tapani Hahtokari

---

The final year research project examines air tightness measurements of an apartment building that were done by measuring one flat at a time and also the whole building at a time. Measurements were completed in 20 flats which is 39 % of the 51 flats in the building. Measuring the whole building, measurements were done so that the complete outer shell was included inside the measurement volume.

All the construction details are introduced in this final exam test. The air tightness details are most observed in construction details. The apartment building has eight different types of construction details in outer shell. For that reason this type of building is classified among mixed construction buildings.

Air leakage rate can be presented either by air leakage rate  $n_{50}$  which is a rate compared to the volume of the building or by air leakage rate  $q_{50}$  which is a rate compared to the area of the outer shell of the building. Comparison between these two rates as way of calculation was one of the main aims in this examination process.

Other examinations have stated that when measuring big buildings, that rate  $q_{50}$  is most suitable for air leakage rate when the volume of the building is bigger than 4000 m<sup>3</sup>. The current research yields the same type of results.

Keywords                      Air tightness, air leakage,  $n_{50}$ -rate,  $q_{50}$ -rate

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ  
ABSTARCT  
LIITELUETTELO

1	JOHDANTO .....	4
2	TUTKIMUSPROSESSIN TAVOITE.....	5
	2.1 Ilmavuotoluvun mittaukset.....	5
	2.2 Kohdetalon ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toiminta .....	5
3	MATALAENERGIAPROJEKTI.....	7
4	KOHDEHALO .....	9
5	ILMAVUOTOLUKU .....	11
	5.1 Ilmavuotoluku $n_{50}$ .....	11
	5.2 Ilmavuotoluku $q_{50}$ .....	11
	5.3 Ilmavuotolukujen $n_{50}$ ja $q_{50}$ suhde .....	11
	5.4 Ilmavuotoluvun laskenta .....	12
	5.5 Ilmavuodon määrä, $V_L$ [ $m^3/h$ ] .....	12
	5.6 Ilmavuodon määrä vertailu paine-erossa 50 Pa, $V_{50}$ [ $m^3/h$ ].....	15
	5.7 Ilmavuotoluku vertailu paine-erossa 50 Pa, $n_{\Delta pr}$ [1/h].....	16
	5.8 Ilmavuotoluku vertailu paine-erossa 50 Pa, $q_{50}$ [ $m^3/(hm)^2$ ]. .....	16
6	KOHDEHALON RAKENTEET.....	17
	6.1 Rakenteen ilmansulun sekä ilmanpitävän rakennuksen toteuttaminen .	17
	6.2 Alapohja .....	18
	6.3 Yläpohja .....	18
	6.4 Julkisivut .....	18
	6.5 Välipohja.....	20
	6.6 Ikkunat ja parvekeovet .....	20
	6.7 Sekarakenteinen rakennus.....	20
	6.8 Julkisivu-, leikkaus-, ja pohjapiirustukset.....	20
7	HUONEISTOKOHTAISET TIIVIYSMITTAUKSET .....	21
	7.1 Mittauslaitteisto.....	21
	7.2 Mittausjärjestelyt.....	22

7.3	Mittaustulokset.....	25
7.4	Tulokset huoneistotyypeittäin .....	26
7.5	Huoneistojen ilmapuotopaikat .....	27
7.6	Huoneistojen lämpökamerakuvaukset .....	32
7.7	Lämpökamerakuvien tulkinta ja tarkkuus .....	35
7.8	Asumisterveysohjeen lämpötilaindeksi.....	36
8	TALOKOHTAINEN TIIVIYSMITTAUS .....	38
8.1	Mittauslaitteisto.....	38
8.2	Mittausjärjestelyt.....	39
8.3	Mittaustulokset.....	46
9	TULOSTEN VERTAILU .....	49
10	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	50

## LIITTEET

## LIITELUETTELO

LIITTEET 1 – 2.	Alapohjarakenteet
LIITE 3.	Yläpohjarakenne
LIITTEET 4 – 8.	Ulkoseinärakenteet
LIITTEET 9 – 12.	Välipohjarakenteet
LIITE 13.	Parvekeovi- ja ikkunaliittymät
LIITTEET 14 – 15.	Julkisivut
LIITTEET 16 – 17.	Leikkauskuvat
LIITTEET 18 – 25.	Pohjakuvat
LIITE 26.	Mittausraportti

# 1 JOHDANTO

Rakennusten tiiviysmittauksia on tehty Suomessa jo 1970-luvun lopulta lähtien (Kauppinen, Ojanen, Kovanen, Laamanen, Vähäsöyrinki, 131. ). Asiaa on siis mietitty jo pidemmän aikaa, mutta vasta viimevuosina asia on tullut ajankohtaiseksi. Ajankohtaiseksi asian teki rakennusten energiatodistukseen vaadittava ilmavuotoluku. Ilmavuotoluku vaikuttaa suoraan rakennusten energialuokkaan. Ilmavuotoluvulla, tai ehkä oikeammin sanottuna, ilmavuodoilla on suuri taloudellinen merkitys rakennusten energiankulutuksessa, varsinkin, jos asiaa tarkastellaan kunta- ja kaupunkitasolla, valtakunnantasosta puhumattakaan.

Lopputyössä keskitytään kerrostalon tiiviysmittaukseen. Mittaukset toteutettiin sekä huoneistokohtaisina että koko taloa koskevinä mittauksina. Mittauksissa käytettiin painekoelaitteistoa, jolla tutkittava tila paineistettiin mittausten ajaksi. Mittaustuloksia tarkastellaan sekä ilmavuotolukuna  $n_{50}$  että ilmavuotolukuna vaipan alaa kohti  $q_{50}$ .

Tutkimukseen sisältyi ilmavuotopaikkojen etsintä. Apuna käytettiin sekä lämpökameraa, että savukynää. Lämpökameratutkimukset suoritettiin 50 Pascalin alipaineessa ja savukynä tutkimukset puolestaan 50 Pascalin ylipaineessa. Pääsääntöisesti lämpökameratutkimuksilla haettiin vuotoja rakennuksen ulkovaipasta ja savukynällä etsittiin huoneistojen välisiä ilmavuotoja.

Ilmavuotoluvun matemaattinen laskenta standardin SFS-EN 13829 mukaan on esitetty lopputyössä.

Lopputyö sisältää tutkitun rakennuksen detaljikuvien tarkastelun. Tarkastelussa ovat mukana kaikki detaljit, joilla on merkitystä ulkovaipan tiiviyteen.

Lopputyö on tehty osana matalaenergia rakentaminen kerrostalotuotannossa projektia.

## **2 TUTKIMUSPROSESSIN TAVOITE**

### **2.1 Ilmavuotoluvun mittaukset**

Lopputyön tavoitteena oli toteuttaa yksiportaisen kerrostalon tiiviysmittaus siten, että rakennuksen koko ulkovaippa saadaan mukaan mittausalueeseen. Etukäteissuunnitelmissa mittauksen toteutus oli periaatteessa yksinkertainen. Kysymyksiä herätti lähinnä mittauslaitteiston ilmavirtauskapasiteetti sekä mittausajankohta. Mittausajankohta oli suuresti riippuvainen urakoitsijan aikataulusta ja sen suhteen ulkovaipan ilmatiiviyden mittausvalmiudesta.

Myös huoneistokohtaisten mittaustulosten vertailu talokohtaiseen tulokseen on osana tutkimusprosessia. RT-kortin, 80–10974 Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje, mukaan kerrostalon ilmanpitävyydestä saadaan riittävän hyvä kuva sekä yksittäisten huoneistojen mittauksella että koko portaan tai koko rakennuksen mittauksella.

### **2.2 Kohdetalon ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toiminta**

Kohdetalon ulkovaipan rakenteet on käsitelty omana kokonaisuutena. Näissä detailjikuvissa huomio kiinnittyy rakenteen ilmatiiviyteen ja erityisesti liitosten toimintaan. Matalaenergiarakentaminen kerrostalotuotannossa -projektin puitteissa kohdetalon työmaalla pidettiin liitosten toteutuksesta koulutustilaisuus, jossa työmaalla työskennelleet saivat koulutuksen liitosten oikeasta ja huolellisesta toteutuksesta.





**KUVA 1.** Puurunkoisen seinän höyrynsulku asennettiin katkeamattomana läpi julkisivun. Liitokset teipattiin huolellisesti. Lokakuu 2009.

### 3 MATALAENERGIAPROJEKTI

Tämä päättötyö on tehty osana matalaenergiarakentamisen kehittäminen kerrostalotuotannossa -projektia.

Pohjanmaan YH-rakennuttajat rakennutti Vaasan asuntomessualueen yhteyteen Suvilahden, Teirintie 1:een Kiinteistö Oy Vaasan Kustaanportin. Kohde tulee sisältämään kaiken kaikkiaan neljä samanlaista kahdeksankerroksista kerrostaloa, joista ensimmäisen rakentaminen alkoi syksyllä 2009 ja seuraavan vuonna 2010. Kaksi muuta toteutuu seuraavina vuosina. Rakennusten suunnittelun ja toteutuksen tavoitteeksi on asetettu energiatehokkuus. (Hahtokari 2009, 3.)

Ensimmäinen kerrostalo rakennettiin vuonna 2009 voimassa olleiden rakentamismääräysten mukaisesti, mutta toisaalta tavoitteeksi asetettiin mahdollisimman energiatehokas kerrostalo. Tavoitteena oli rakentamisen laadun avulla päästä mahdollisimman lähelle matalaenergiakerrostalon energian kulutusta. Ensimmäinen kerrostalo oli kokonaishankkeen ns. seurantakohde ja toimenpiteet kohdistuvat tämän Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa - hankkeen aikana tähän ensimmäisenä rakennettavaan kerrostaloon. Hankkeessa haettiin vertailu- ja pohjatietoa tulevalle matalaenergia- ja passiivirakentamiselle. (Hahtokari 2009, 3.)

Kokonaisuudessaan Suvilahden kerrostalohanke jakaantui kahteen osioon. Tässä ensimmäisessä osiossa, Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa -hankkeessa, kerättiin tietoa vuoden 2009 ohjeiden mukaisesti toteutetusta rakennuksesta. Tätä tietoa tullaan hyödyntämään seuraavina vuosina rakennettavien talojen suunnittelussa, joka toteutetaan jatkohankkeena Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa – hankkeelle. (Hahtokari 2009, 4.)

Koska passiivirakentamisen eristämisen tasosta rakennusfysikaalisen toiminnan suhteen on epätietoisuutta, hankkeen aikana seurataan mittauksin vaipan lämpö-, kosteusteknistä toimivuutta eristeen sisä- ja ulkopinnasta rakennuksen eri ilmansuunnissa ja eri kerroksissa nykyisten ohjeiden mukaan toteutetussa rakennuksessa sekä jatko-hankkeessa passiivirakennuksessa. (Hahtokari 2009, 3.)

Rakentamisen laatuun kiinnitettiin erityistä huomiota. Rakentamiseen osallistuville työntekijöille järjestettiin ennen rakentamisen alkua infopäivä, jossa käytiin läpi rakentamiselle asetetut energiatehokkuuden tavoitteet (eristäminen, tiiveys, läpiviennit jne.), työmaalla huomioitavia toimenpiteitä tavoitteiden saavuttamiseksi sekä rakentamisen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Hankkeen toteuttamisen kannalta oli tärkeää, että työntekijät olivat tietoisia rakennuksen energiankulutuksen tavoitetasosta pyrittäessä laadukkaalla rakentamisella lähelle matalaenergiakerrostalon energiankulutusta. (Hahtokari 2009, 6.)

Hankkeessa rakennuksen tiiveydelle asetettiin passiivirakentamisen tavoite, jolloin ilmanvuotoluvun on oltava  $\leq 0.6$ . (Hahtokari 2009, 6.)

Tavoitteena oli, että rakennusten vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviöitä rajoitetaan energiatehokkuuden saavuttamiseksi. Lämmöneristyksen toimivuus ja vaipan ilmatiiveys todennettiin lämpökuvauksen ja tiiveysmittauksen avulla ennen sisäpintojen viimeistelyä sekä toisen kerran rakennuksen käyttöönoton yhteydessä. Toisella mittauksella varmistettiin, että mahdolliset vuodot olivat korjaantuneet. (Hahtokari 2009, 6.)

Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa hankkeeseen osallistui seuraavat tahot:

- Vaasan ammattikorkeakoulu, hankkeen toteutus, koordinointi- ja hallinnointivastuu. Hankkeessa työskentelevät henkilöt: Tapani Hahtokari, projektipäällikkö, Jukka Matila, lehtori, Mika Korpi, laboratorioinsinööri, Seija Välivainio, projektikoordinaattori
- Tampereen teknillinen yliopisto, Timo Kalema, energiatekniikan professori
- Vaasan energiainstituutti, ohjausryhmän jäsen
- Pohjanmaan YH-rakennuttajat Oy, partneri
- Peab Oy, partneri
- Ekolämpö Oy (Vaasan asuntomessualueen lämpölaite). (Hahtokari 2009, 10.)

## 4 KOHDETALO

Kohdetalona tutkimuksessa oli Kiinteistö OY Vaasan Kustaanportti, Teirinkatu 2, 65200 Vaasa. Työmaa käynnistyi syksyllä 2009 ja valmiin kohteen luovutus oli vuoden päästä 2010 syksyllä.



**KUVA 2.** Kohdetalo, Kiinteistö OY Vaasan Kustaanportti maaliskuussa 2010.



**KUVA 3.** Kohdetalo, Kiinteistö OY Vaasan Kustaanportti elokuussa 2010.

## 5 ILMAVUOTOLUKU

### 5.1 Ilmavuotoluku $n_{50}$

Ilmavuotoluku  $n_{50}$  kertoo, montako kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta, kun rakennukseen aiheutetaan 50 Pa (Pascal) ali- tai ylipaine. Ilmavuotoluku kuvaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. (RT 80 - 10974, 2009, 2)

Ilmavuotoluku  $n_{50}$  [1/h] voidaan laskea kaavalla 1.

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} \quad (1)$$

missä  $V_{50}$  on ilman tilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron aiheuttamiseksi rakennuksen vaipan yli [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$V$  on rakennuksen ilmatilavuus [ $\text{m}^3$ ] (RT 80 – 10974, 2009, 11)

### 5.2 Ilmavuotoluku $q_{50}$

Vuonna 2010 voimaan astuneiden ympäristöministeriön ohjeiden mukaan rakennuksen ilmavuotoluku, voidaan määrittää myös vaipan pinta-alaa kohti  $q_{50}$ -lukuna [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ].

Ilmavuotoluku  $q_{50}$  [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ] voidaan laskea  $n_{50}$ -luvusta kaavalla 2.

$$q_{50} = n_{50} \frac{V}{A_E} \quad (2)$$

missä  $A_E$  on rakennuksen vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna [ $\text{m}^2$ ] (RT 80 – 10974, 2009, 11)

### 5.3 Ilmavuotolukujen $n_{50}$ ja $q_{50}$ suhde

$n_{50}$ -luku yleensä pienenee rakennuksen tilavuuden kasvaessa, vaikka vaipan ilmanpitävyys ei paranekaan. Tämä johtuu siitä, että sisätilavuuden kasvaessa yleensä myös suhde  $V/A_E$  kasvaa. Esimerkiksi pientaloissa suhde  $V/A_E$  vaihtelee

tyypillisesti välillä 0,7 - 1,5, mutta kerrostaloissa suhde on tyypillisesti välillä 2,0 - 3,5, jos ilmanpitävyys mitataan koko portaan tai koko rakennuksen mittauksena. Tästä johtuen  $q_{50}$ -luku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä suuremmissa rakennuksissa. (RT 80 – 10974, 2009, 11)

#### 5.4 Ilmavuotoluvun laskenta

Käytännössä ilmavuotoluvun laskenta suoritetaan mittauslaitteistojen mukana tulevilla ohjelmistoilla. Mittausta varten mitataan ulko- ja sisälämpötilat sekä laskeaan rakennuksen ilmatilavuus ja ulkovaipan ala. Nämä lähtötiedot syötetään mitausohjemaan. Lähtötietoja sekä mittauksen aikana kerättäviä paine-ero sekä ilmavirtaustietoja hyödyntäen, ohjelmisto laskee automaattisesti sekä  $n_{50}$  että  $q_{50}$ -luvut.

#### 5.5 Ilmavuodon määrä, $V_L$ [ $m^3/h$ ]

Standardin SFS-EN 13829 (Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method) mukainen ilmavuotoluvun laskenta esitetään seuraavissa kaavoissa.

Tuotettu paine-eron muutos  $\Delta p$  [Pa] voidaan laskea kaavalla 3.

$$\Delta p = \Delta p_m \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad (3)$$

missä  $\Delta p$  on tuotettu paine-eron muutos [Pa]

$\Delta p_m$  on mitattu paine-ero [Pa]

$\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}$  on nollavirtauksen paine-ero ennen ja jälkeen mittauksia (mittauslaitteisto suljettuna) [Pa]

Ilmavirtauslaitteiston antamat virtauslukemat  $V_r$  [ $m^3/h$ ] muutetaan mitatuksi ilmavirtauslukemaksi  $V_m$  [ $m^3/h$ ] kaavalla 4, mittauslaitteessa vallitsevassa lämpötilassa ja paine-erossa valmistajan ohjeiden mukaan.

$$V_m = f(V_r) \quad (4)$$

missä  $V_m$  on mitattu ilmavirtaus [ $m^3/h$ ]

$V_r$  on ilmavirtaus lukemat [ $m^3/h$ ]

Mitattu ilmavirtaus  $V_m$  [ $m^3/h$ ], muutetaan ilmavirtaukseksi vaipan läpi  $V_{env}$  [ $m^3/h$ ] alipainekokeessa kaavalla 5.

$$V_{env} = V_m \frac{\rho_i}{\rho_e} \quad (5)$$

missä  $V_{env}$  on ilmavirtaus vaipan läpi [ $m^3/h$ ]

$V_m$  on mitattu ilmavirtaus [ $m^3/h$ ]

$\rho_i$  on sisäilman tiheys [ $kg/m^3$ ]

$\rho_e$  on ulkoilman tiheys [ $kg/m^3$ ]

Mitattu ilmavirtaus  $V_m$  [ $m^3/h$ ], muutetaan ilmavirtaukseksi vaipan läpi  $V_{env}$  [ $m^3/h$ ] ylipainekokeessa kaavalla 6.

$$V_{env} = V_m \frac{\rho_e}{\rho_i} \quad (6)$$

missä  $V_{env}$  on ilmavirtaus vaipan läpi [ $m^3/h$ ]

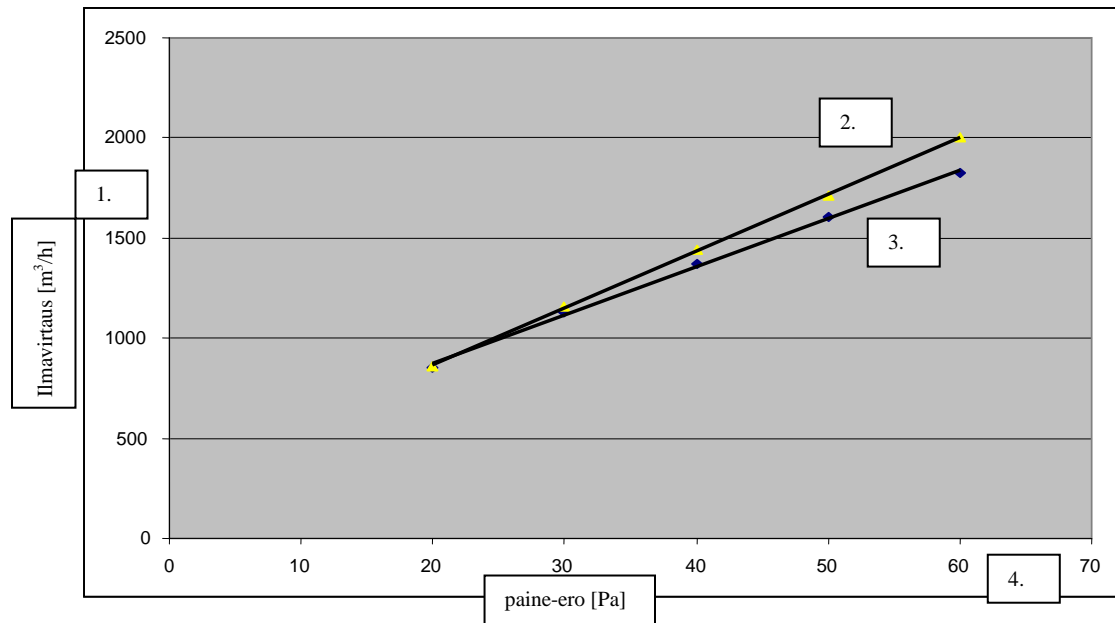
$V_m$  on mitattu ilmavirtaus [ $m^3/h$ ]

$\rho_e$  on ulkoilman tiheys [ $kg/m^3$ ]

$\rho_i$  on sisäilman tiheys [ $kg/m^3$ ]

Esimerkkikuva lasketuista ilmavirtauksista vaipan läpi [ $m^3/h$ ] tietyissä paineroissa [Pa] sekä ali- että ylipaineessa on piirrettynä seuraavaan kaavioon.





KUVA 4. Esimerkkikuva ali- ja ylipainekäyristä. 1. Ilmavirtaus [ $\text{m}^3/\text{h}$ ], 2. Ylipainekoe, 3. Alipainekoe, 4. Paine-ero [Pa]

Seuraavaksi määritetään ilmavirtauskerroin  $C_{\text{env}}$  [ $\text{m}^3/\text{hPa}^n$ ] sekä ilmavirtaus eksponentti  $n$  kaavalla 7.

$$V_{\text{env}} = C_{\text{env}} (\Delta p)^n \quad (7)$$

missä  $V_{\text{env}}$  on ilmavirtaus vaipan läpi [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$\Delta p$  on aikaansaatua paine-eron muutos [Pa]

Sekä ilmavirtauskerroin  $C_{\text{env}}$  [ $\text{m}^3/\text{hPa}^n$ ] että ilmavirtaus eksponentti  $n$  määritetään sekä ali- että ylipainekokeelle erikseen.

Ilmavuotokertoimen  $C_L$  muuttamiseksi standardi olosuhteisiin [(20±1)°C ja 1,013 x 10<sup>5</sup> Pa] korjataan ilmavirtauskerrointa  $C_{\text{env}}$  kaavalla 8 alipainekokeessa.

$$C_L = C_{\text{env}} \left( \frac{\rho_e}{\rho_0} \right)^{1-n} \quad (8)$$

missä  $\rho_e$  on ulkoilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_0$  on ilman tiheys standardi olosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Ilmavuotokertoimen  $C_L$  muuttamiseksi standardi olosuhteisiin [(20±1)°C ja 1,013 x 10<sup>5</sup> Pa] korjataan ilmavirtauskerrointa  $C_{\text{env}}$  kaavalla 9 ylipainekokeessa.

$$C_L = C_{\text{env}} \left( \frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^{1-n} \quad (9)$$

missä  $\rho_i$  on sisäilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_0$  on ilman tiheys standardi olosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Ilmavuodon määrä  $V_L$  voidaan nyt laskea kaavalla 10.

$$V_L = C_L (\Delta p)^n \quad (10)$$

missä  $C_L$  on ilmavuotokerroin [ $\text{m}^3/\text{hPa}^n$ ]

$\Delta p$  on aikaansaatu paine-eron muutos [Pa]

$n$  on ilmavuoto eksponentti kaavasta 7, joka määrittää piirretyn kuvaajan muodon.

## 5.6 Ilmavuodon määrä vertailu paine-erossa 50 Pa, $V_{50}$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Ilmavuodon määrän vertailu paine-erossa 50 Pa, määritetään kaavalla 11.

$$V_{\Delta p_r} = C_L (\Delta p_r)^n \quad (11)$$

esimerkiksi  $V_{50}$  on  $C_L (50\text{Pa})^n$

missä  $C_L$  on ilmavuotokerroin [ $\text{m}^3/\text{hPa}^n$ ]

### 5.7 Ilmavuotoluku vertailu paine-erossa 50 Pa, $n_{\Delta pr}$ [1/h]

Ilmavuotoluku vertailu paine-erossa 50 Pa, määritetään kaavalla 12.

$$n_{\Delta pr} = \frac{V_{\Delta pr}}{V} \quad (12)$$

esimerkiksi  $n_{50} = \frac{V_{50}}{V}$

### 5.8 Ilmavuotoluku vertailu paine-erossa 50 Pa, $q_{50}$ [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ].

Rakennuksen ilmavuotoluku  $q_{50}$  voidaan määrittää myös vaipan pinta-alaa kohti  $q_{50}$ -lukuna [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ].

Ilmavuotoluku  $q_{50}$  [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ] voidaan laskea  $n_{50}$ -luvusta kaavalla 13.

$$q_{50} = n_{50} \frac{V}{A_E} \quad (13)$$

## 6 KOHDETALON RAKENTEET

Tutkimusten mukaan suurin osa ilmapuotokohdista on eri rakenneosien (ulkoseinä, yläpohja, alapohja, välipohja, ikkunat, ovet) välisissä liitoskohdissa sekä läpivientien kohdalla. Rakennuksen ilmanpitävyyden kannalta onkin olennaista, että eri rakenneosien ilmansulut liittyvät toisiinsa ja ilmapitäväkerros jatkuu yhtenäisenä koko rakennusvaipan yli. (Aho, Korpi, 2009, 1.)

Rakennuksen ilmanpitävyyttä on tutkittu Suomessa painekoemenetelmällä laajemmin viimeisten parinkymmenen vuoden ajan. Uusimpia laajoja tutkimuksia aiheesta on Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen ja Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorion tekemät tutkimukset 100 puurunkoisessa pientalossa, 20 hirsitalossa, 50 kivitalossa ja 56 kerrostaloasunnossa. Uudehkojen puurunkoisten pientalojen  $n_{50}$ -luvun keskiarvo oli 3,9 1/h, hirsitalojen 6,0 1/h, kivitalojen 2,3 1/h ja kerrostaloasuntojen 1,6 1/h. Kerrostalot oli mittauksissa jaettu puukerrostaloihin (keskiarvo 2,9 1/h), betonielementtikerrostaloihin (1,6 1/h) sekä kerrostaloihin, joissa välipohjat olivat paikalla valettuja (0,7 1/h) (Aho, Korpi, 2009, 9.)

Tutkimuksissa tehdyissä lämpökamerakuvauksissa löydettiin tyypillisimmät ilmapuotokohdat. Kerrostaloissa suurimmat puotokohdat olivat ikkunat ja ovet ja niiden liitoskohdat (72 %). Seuraavaksi suurimmat puotokohdat olivat ulkoseinän ja välipohjan liitos (11 %) ja ulkoseinän ja yläpohjan liitos (8%). (Aho, Korpi, 2009, 9.)

### 6.1 Rakenteen ilmansulun sekä ilmanpitävän rakennuksen toteuttaminen

Rakenteen ilmatiiviys toteutetaan yleensä erillisellä ilmansulkukerroksella, ellei rakenne itsessään ole riittävän ilmanpitävä. Kerroksellisissa rakenteissa tarvitaan aina höyrynsulku, joka usein toimii myös ilmansulkukerroksena. Muuratuissa harkkorakenteissa ilmansulkukerros on yleensä tasoitekerros ja puurankarakenteissa erillinen kalvomainen tai levymäinen ilman- ja höyrynsulkukerros. Massii-

visissa rakenteissa ei välttämättä tarvita erillistä ilmansulkukerrosta, mikäli rakenteen ilmatiiviys itsessään on riittävä. Ilmanpitävän kerroksen tulee jatkaa yhtenäisenä koko rakennuksen vaipan ympäri, joten eri rakenneosien ilmansulkujen tulee liittyä tiiviisti toisiinsa. Hyvin suunnitellut rakennedetaljit eivät kuitenkaan yksinään johda ilmanpitävään ratkaisuun. Työn tekijällä ja työnjohdolla täytyy olla tieto siitä, miksi halutaan tehdä ilmanpitävä rakennus ja motivoida tehdä se. Tällöin työ suoritetaan riittävällä huolellisuudella. (Aho, Korpi, 2009, 10.)

## **6.2 Alapohja**

Rakennuksessa on maanvarainen alapohja. Alapohjarakenne on esitetty liitteessä 1, tunnuksella AP 1. Väestönsuojan kohdalla alapohjarakenne poikkeaa muusta alapohjarakenteesta pintabetonin paksuuden ja raudoituksen osalta. Tämä rakenne on esitetty liitteessä 2, tunnuksella AP 2.

Eristeenä alapohjarakenteissa on käytetty 120 mm polystyreenilevyä. U-arvo rakenteen reuna-alueilla (0...1m) on 0,24 W/m<sup>2</sup>K ja muualla 0,21 W/m<sup>2</sup>K.

## **6.3 Yläpohja**

Yläpohjarakenne on 265 mm paksu ontelolaatta, joka päälle on asennettu SFS 4225 -luokan E mukainen höyrynsulkumuovi. Saumat on limitetty 200 mm matkalta ja ne on teipattu kiinni. Muovin päällä on 350 mm puhallusvillaeristettä. U-arvo rakenteella on 0,15 W/m<sup>2</sup>K. Rakenne on esitetty liitteessä 3, tunnuksella YP 1.

## **6.4 Julkisivut**

Rakennuksen ulkoseinät voidaan jakaa kantaviin ja ei kantaviin ja lisäksi jako voidaan tehdä julkisivumateriaalin mukaan tiiliverhoukseen tai peltiverhoukseen. Kantavan ulkoseinän rakenne (tiiliverhous) on esitetty liitteessä 4, tunnuksella US 2 ja ei kantavan ulkoseinän rakenne (tiiliverhous) on esitetty liitteessä 5, tunnuk-

sella US 1. Kantavan ulkoseinän rakenne (peltiverhous) on esitetty liitteessä 6, tunnuksella US 5 ja ei kantavan ulkoseinän rakenne (peltiverhous) on esitetty liitteessä 7, tunnuksella US 4. Lisäksi väestönsuojan kohdalla ulkoseinärakenne on poikkeava. Tämä rakenne on esitetty liitteessä 8, tunnuksella US 3.

Ei-kantavan tiiliverhotun ulkoseinän (US 1) puurunko on paksuudeltaan 125 mm. Rungon sisäpintamateriaalina on käytetty 13 mm kipsilevyä ja höyrynsulkumuovina on käytetty SFS 4225 -luokan E mukaista höyrynsulkumuovia. Höyrynsulkumuovien saumat on limitetty 200 mm:n matkalta ja ne on teipattu kiinni. Eristeenä puurungossa on käytetty 125mm mineraalivillaa ja tuulensuojalevynä 50mm tuulensuojamineraalivillaa. U-arvo rakenteella on 0,23 W/m<sup>2</sup>K.

Kantavan tiiliverhotun ulkoseinän ( US 2) kantava paikalla valettu betoniseinä on paksuudeltaan 160 mm. Eristeenä rungossa on käytetty 175mm tuulensuojamineraalivillaa. U-arvo rakenteella on 0,22 W/m<sup>2</sup>K.

Kantavan peltiverhotun ulkoseinän ( US 5) kantava paikalla valettu betoniseinä on paksuudeltaan 160 mm. Tämän ulkopuolella on 125 + 50 mm puurunko jossa eristeenä 125 mm + 50 mm mineraalivilla. Tuulensuojalevynä 9 mm kipsilevy. U-arvo rakenteella on 0,22 W/m<sup>2</sup>K.

Ei-kantavan peltiverhotun ulkoseinän ( US 4) puurunko on paksuudeltaan 125+50 mm. Rungon sisäpintamateriaalina on käytetty 13 mm kipsilevyä ja höyrynsulkumuovina on käytetty SFS 4225 -luokan E mukaista höyrynsulkumuovia. Höyrynsulkumuovien saumat on limitetty 200 mm:n matkalta ja ne on teipattu kiinni. Eristeenä puurungossa on käytetty 125 + 50 mm mineraalivillaa ja tuulensuojalevynä on käytetty 9 mm kipsilevyä. U-arvo rakenteella on 0,25 W/m<sup>2</sup>K.

Väestönsuojan kohdalla kantavan ulkoseinän ( US 3) kantava paikalla valettu betoniseinä on paksuudeltaan 350 mm. Tämän ulkopuolella on 125 + 50 mm puurunko, jossa eristeenä 125 mm + 50 mm mineraalivilla. Tuulensuojalevynä 9 mm kipsilevy. U-arvo rakenteella on 0,22 W/m<sup>2</sup>K.

## **6.5 Välipohja**

Välipohjan rakennetyyppejä kohteessa on neljää eri tyyppiä. VP 1, VP 2, VP 3 ja VP 4. Edellä mainitut rakennetyypit on esitelty liitteissä 9, 10, 11 ja 12.

## **6.6 Ikkunat ja parvekeovet**

Ikkuna- ja parvekeovi liittymädetaljit on esitelty liitteessä 13.

## **6.7 Sekarakenteinen rakennus**

Sekarakenteiseksi rakennukseksi voidaan kutsua rakennusta, jossa on käytetty useampia eri rakennetyyppejä ulkovaipassa. Näin ollen myös kohdetaloa voidaan kutsua sekarakenteiseksi. Sekarakenteiden yhteensovittaminen on usein ongelmallista, koska ratkaisuja ei ole ohjeistettu riittävästi. Ilmanpitävyyden varmistamiseksi rakennuksen ilmanpitävän kerroksen jatkuminen rakennusosasta toiseen tulee suunnitella ja toteuttaa kokonaisuutena. (Aho, Korpi, 2009, 72.)

## **6.8 Julkisivu-, leikkaus-, ja pohjapiirustukset**

Rakennuksen julkisivu-, leikkaus ja pohjapiirustukset on esitetty liitteissä 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ja 25.

## **7 HUONEISTOKOHTAISET TIIVIYSMITTAUKSET**

Rakentamisvaiheessa suoritettujen huoneistokohtaisten mittausten tarkoituksena oli ensisijaisesti selvittää ilmavuotopaikkojen sijainti. Myös ilmavuotoluku  $n_{50}$  ja ilmavuotoluku vaipan pinta-alaa kohden  $q_{50}$  mitattiin sekä yli- että alipainekokein. Ulkovaipan ilmavuotopaikkojen selvityksessä käytettiin apuna lämpökamerakuvausta. Tätä varten huoneistoihin tuotettiin 50 Pascalin alipaine BlowerDoor-laitteistolla. Väliseinä ja välipohjarakenteita tutkittiin puolestaan savukynän avulla 50 Pascalin ylipaineessa.

Mittaukset aloitettiin ylimmästä kerroksesta maaliskuussa 2010, josta ne etenivät rakentamisen etenemisen myötä alaspäin. Viimeiset huoneistot mitattiin valmiina elokuussa 2010.

### **7.1 Mittauslaitteisto**

Paine-eron tuottamiseen ja ilmavuotoluvun määrittämiseen käytettiin Minneapolis BlowerDoor-laitteistoa (model 4.1, sarjanumero 17413-106, kalibroitu 31.8. 2009). Lämpötilamittaukset suoritettiin Waisala HMI41-mittarilla sekä mittapäällä HMP 42, (sarjanumero E2530001, kalibroitu 17.6. 2009). Lämpökamerakuvauksessa käytettiin Flir ThermaCam PM 495 -kameraa, (sarjanumero 15110050, kalibroitu 2.7. 2009). Lisäksi tutkimuksissa käytettiin savukynää.





**KUVA 5.** Minneapolis BlowerDoor-laitteisto asennettuna huoneiston parveke oveen.

## 7.2 Mittausjärjestelyt

Ylimmänkerroksen huoneistot saavuttivat mittausvalmiuden maaliskuussa 2010. Tässä vaiheessa huoneistoista puuttuivat vielä huoneistokohtaiset rappukäytävien ovet. Tästä syystä oviaukkojen peittämiseen tilattiin ylimääräinen Minneapolis BlowerDoor-laitteiston mukainen ovikehys. Ovikehykseen asetettiin mittauksien ajaksi umpinainen vahakangas.



**KUVA 6.** Huoneiston rappukäytäväoven tiivistäminen.

Sähköä huoneistoissa ei vielä ollut. Sähköjohto jouduttiin tuomaan huoneistoihin rappukäytävän ovikehyksen läpi. Tätä läpivientä oli erittäin vaikea saada tiiviiksi työmaan pölyisyyden takia. Tämä vuoto todettiin savukynätutkimuksissa ja sillä on oma merkityksensä myös huoneistokohtaisiin ilmavuotolukuihin.

Huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistokanavia oli mahdoton tulppata koneiden sisältä koneiden ahtauden takia. Tästä syystä huoneistoissa jouduttiin tulppaamaan jokaisen tulo- ja poistoilmakanavan pää.



**KUVA 7.** Huoneiston ilmanvaihtokone.

Lisäksi liesituulettimen putki tulpattiin. Myös viemärit ja lattiakaivot tulpattiin mittauksien ajaksi. Minneapolis BlowerDoor -mittauslaitteisto asetettiin jokaisessa mitatussa huoneistossa parvekeoveen.

Maalis-huhtikuussa suoritettujen mittauksen jälkeen mittauksia päätettiin jatkaa myöhemmin. Maalis-huhtikuun aikana mitattiin 13 huoneistoa. Mittauksia jatkettiin kesäkuussa 2010, jolloin huoneistot olivat jo lähes valmiita, ja lisäksi huoneistoissa oli sähköä saatavilla. Kesäkuussa mitattiin viisi huoneistoa, ja lisäksi vielä elokuussa mitattiin kaksi täysin valmiista huoneistoa.

Kaiken kaikkiaan huoneistokohtaisia mittauksia suoritettiin 20 kappaletta. Neljä huoneistoa mitattiin kahteen kertaan, ensimmäisen kerran maaliskuussa ja toisen kerran kesäkuussa.

Rakennuksessa on seitsemän erilaista huoneistoa. Näistä yhtä huoneistotyyppiä ei pystytty mittaamaan, koska kulku työmaahissistä rakennukseen oli tämän huoneistotyyppin parvekeoven kautta. Lisäksi huoneistossa olevan avoimen sähkökii-  
lun tiivistäminen oli mahdotonta. Mittauksia suoritettiin kaikissa muissa kuudessa huoneistotyyppissä.

### 7.3 Mittaustulokset

Alla olevassa taulukossa on esitettyä huoneistokohtaiset mittaustulokset.

**Taulukko 1.** Huoneistokohtaiset mittaustulokset.

Pvm	Asunto	V	V <sub>50</sub>	n <sub>50</sub>	A <sub>E</sub>	q <sub>50</sub>
16.3.2010	46	190	658	3.46	233	2.82
23.3.2010	39	190	535	2.82	233	2.30
26.3.2010	25	190	484	2.55	233	2.08
13.4.2010	11	190	314	1.65	233	1.35
13.8.2010	18	190	354	1.86	233	1.52
17.3.2010	49	104	550	5.29	150	3.67
26.3.2010	35	104	314	3.01	150	2.09
17.3.2010	45	109	330	3.03	151	2.19
23.3.2010	38	109	396	3.80	151	2.74
21.6.2010	45	109	227	2.09	151	1.51
22.6.2010	38	109	314	2.88	151	2.08
17.3.2010	48	129	494	3.83	177	2.80
21.6.2010	48	129	418	3.24	177	2.36
22.6.2010	41	129	370	2.87	177	2.09
13.8.2010	20	129	303	2.35	177	1.71
16.3.2010	47	157	503	3.20	202	2.49
23.3.2010	40	157	442	2.82	202	2.20
21.6.2010	47	157	442	2.82	202	2.19
19.3.2010	50	150	360	2.40	200	1.80
26.3.2010	43	150	415	2.76	200	2.07
				KA: 2.94		KA: 2.20

Mittaustuloksista voidaan selvästi havaita, että ilmavuotoluku parani sitä mukaa kun työt huoneistoissa etenivät. Maaliskuun ensimmäisten ylipainekokeiden ja savukynätutkimusten perusteella urakoitsijaa informoitiin havaituista vuotokohdista. Kyseiset vuodot olivat pääsääntöisesti rakennuksen sisäisiä vuotoja. Näitä

vuotoja tilkittiin alemmissa kerroksissa uretaanivaahdolla ja se näkyi selvästi myös tuloksissa. Huoneistot 38, 45, 47 ja 48 mitattiin kahteen kertaan rakennustyön eri vaiheissa. Ilmavuotoluku muuttui parempaan suuntaan välillä 0,4 – 1,0 yksikköä.

Ilmavuotoluku  $n_{50}$  vaihteli huoneistossa välillä 1.65 – 5.29 1/h, keskiarvon ollessa 2.94 1/h. Vaipanpinta-alaa kohti määritetty ilmavuotoluku  $q_{50}$  puolestaan vaihteli välillä 1.35 – 3.67  $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ , keskiarvon ollessa 2.20  $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ .

#### 7.4 Tulokset huoneistotyypeittäin

Huoneistotyypeittäin tuloksia tarkasteltaessa huoneistot nimetään tilavuuden mukaan. Esimerkiksi huoneistotyyppi V190 – tarkoittaa huoneistoja, joiden tilavuus on 190  $\text{m}^3$ .

**Taulukko 2.** Mittauskeskiarvot huoneistotyypeittäin.

Huoneistotyyppi	Keskiarvo $n_{50}$ [1/h]	Keskiarvo $q_{50}$ [ $\text{m}^3/(\text{hm})^2$ ]
V190	2.47	2.01
V157	2.94	2.29
V150	2.57	1.94
V129	3.07	2.24
V109	2.95	2.13
V104	4.15	2.88

Koska mittaustuloksia on aika vähän huoneistotyyppiä kohden, pidemmälle meneviä johtopäätöksiä ei tuloksista voida tehdä. Tuloksista näkyy kuitenkin jossain määrin se, että tilavuuden pienentyessä ilmavuotoluku  $n_{50}$  kasvaa. Huoneistoissa tehtyjen savukynätutkimusten perusteella voidaan sanoa, että vuotopaikat olivat lähes jokaisessa huoneistossa samankaltaiset. Tästä syystä tilavuuden pienentyessä ilmavuotoluku  $n_{50}$  pääsääntöisesti kasvaa. Samansuuntaisesti muuttuu myös ilmavuotoluku  $q_{50}$ , mutta suhteessa vähemmän. Seuraavassa kappaleessa esitetään ilmavuotopaikat tarkemmin.

## 7.5 Huoneistojen ilmavuotopaikat

Ilmavuotopaikkojen selvittämiseksi huoneistoihin tuotettiin 50 Pascalin ylipaine BlowerDoor-laitteistolla. Huoneistojen vaipparakenne kierrettiin läpi savukynää apuna käyttäen. Jos rakenteessa ilmeni vuotoa, niin savu pakeni ylipaineen ansios-ta rakenteen sisään.

Kaikkein ongelmallisin vuotokohta löytyi huoneistojen läpi pystysuunnassa kulkevasta ilmanvaihtokoneiden poistoilmakanavasta. Jokaisen huoneiston vuorivil-lalla eristetty poistoilmakanava yhtyy Ako-elementeistä rakennettuun hormiin. Tämän hormin ja ilmanvaihtokoneelta tulevan poistoilmaputken läpiviennit vuoti-vat. Lisäksi Ako-elementtien yläpäänliitos vasten ontelolaattaa oli tiivistämättä.



**KUVA 8.** Poistoilmaputken läpivienti pystyhormiin.

Toinen merkittävä vuotokohta oli sähköläpivientien aiheuttamat reiät huoneistojen katoissa. Syöttökaapelit sekä kaikki huoneistojen kattosähköasiat on putkitettu yläpuolisen ontelolaatan päälle. Putkitusten päälle on asennettu kovavilla, jonka päällä puolestaan on tehty pintavalu. Pintavalun ja seinärakenteiden väliin on asennettu solumuovikaistale, joka puolestaan ei ole kauttaaltaan tiivis. Näitä reittejä pitkin ilma liikkuu huoneistojen välillä. Rakennuksen energiankulutukseenhan näillä vuodoilla ei ole merkitystä, mutta huoneistojen välinen ilmastoineristys heikkenee jossain määrin näiden vuotojen takia.



**KUVA 9.** Sähköläpiviennit ontelolaatassa.



**KUVA 10.** Reikä eristetilaan solumuovikaistaleen, lattian pintalaatan ja seinärakenteen välissä.



**KUVA 11.** Reikä eristetilaan solumuovikaistaleen, lattian pintalaatan ja seinärakenteen välissä.



Yhteenvetona voidaan todeta, että huoneistoissa merkittävimmät ilmavuodot esiintyivät huoneistojen välisinä, näistä merkittävimmät olivat ilmanvaihtokoneen poistoilmakanavan liitos hormiin sekä sähköläpivientien aiheuttamat vuodot. Ulkovaipan lämpökameratutkimuksista voidaan todeta, että merkittäviä vuotoja huoneistoissa ei esiintynyt. Lämpökamerakuvauksesta lisää seuraavassa kappaleessa.



**KUVA 12.** Liitoksia tiivistettiin mm. uretaanivaahdolla.

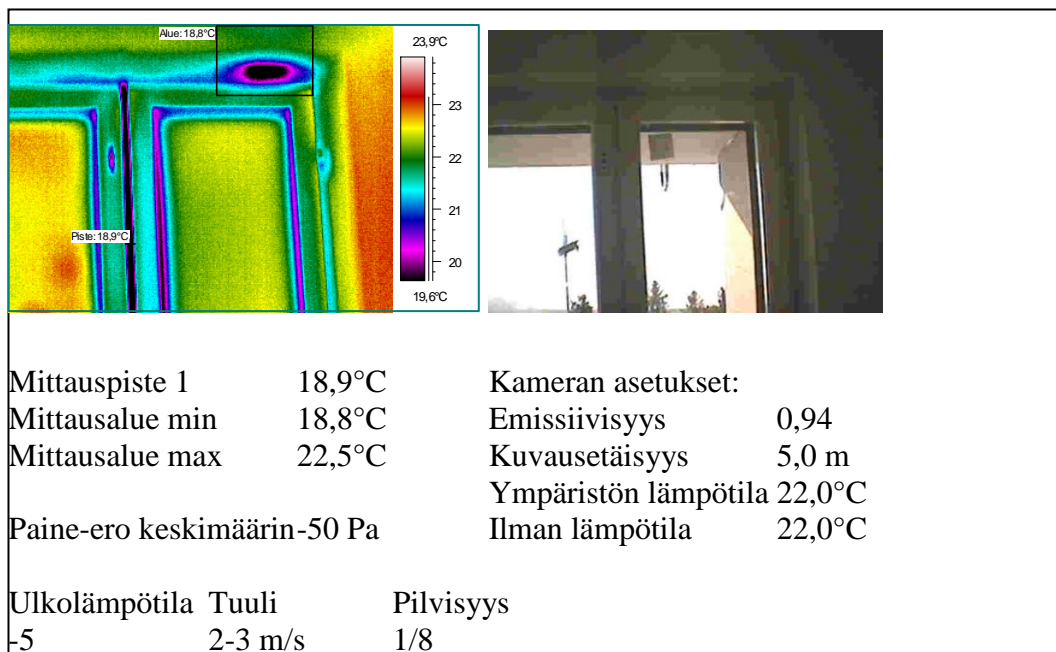


**KUVA 13.** Lattialämmitysputkien ylöstulossa sekä pintalaatan reuna-alueella on rakennuksen sisäisiä ilmavuotoja.

## 7.6 Huoneistojen lämpökamerakuvaukset

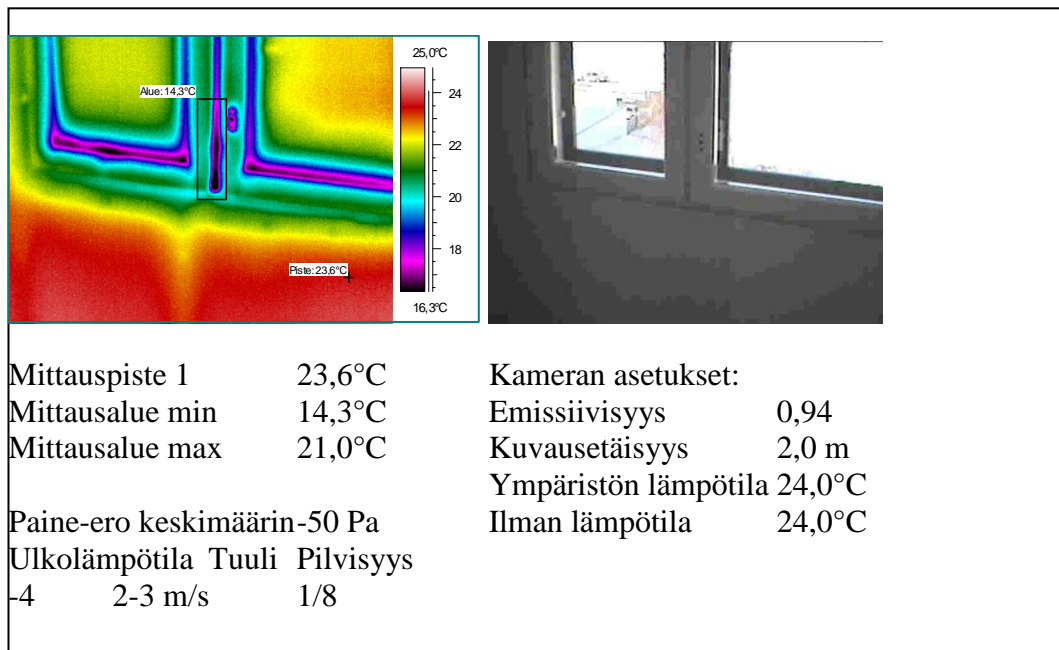
Maalis-huhtikuussa suoritettujen mittausten aikana huoneistojen ulkovaipparakenteita tutkittiin lämpökamerakuvauksin. Kuvauksia varten huoneistoihin tuotettiin 50 pascalin alipaine BlowerDoor-laitteistolla. Alipaineen annettiin jäähdyttää rakenteita puolen tunnin ajan, ennen kuin kuvauksiin ryhdyttiin. Ulkovaipparakenteissa ei suurempia puutteita lämpökamerakuvauksella havaittu. Seuraavaksi on esiteltynä muutamia tyypillisiä lämpökamerakuvia rakenteista.

Huoneisto 46.

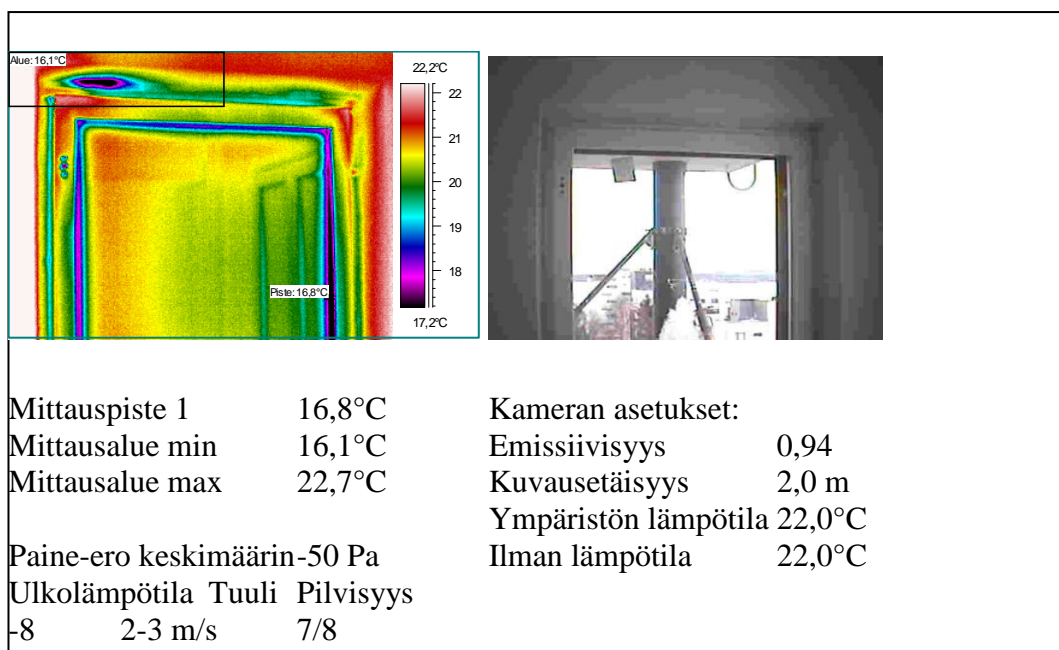


**LÄMPÖKAMERAKUVA 1.** Ikkunatiivisteen ja ikkunakarmin ja seinärakenteen vähäistä vuotoa.

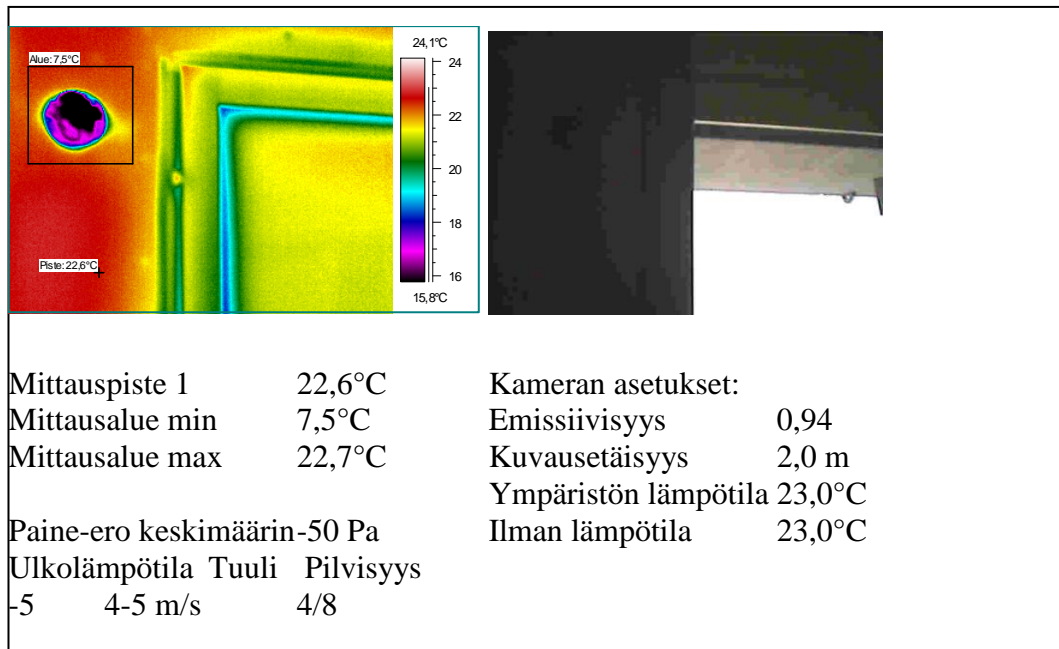
## Huoneisto 47.

**LÄMPÖKAMERAKUVA 2.** Ikkunatiivisteessä vähäistä ilmavuotoa.

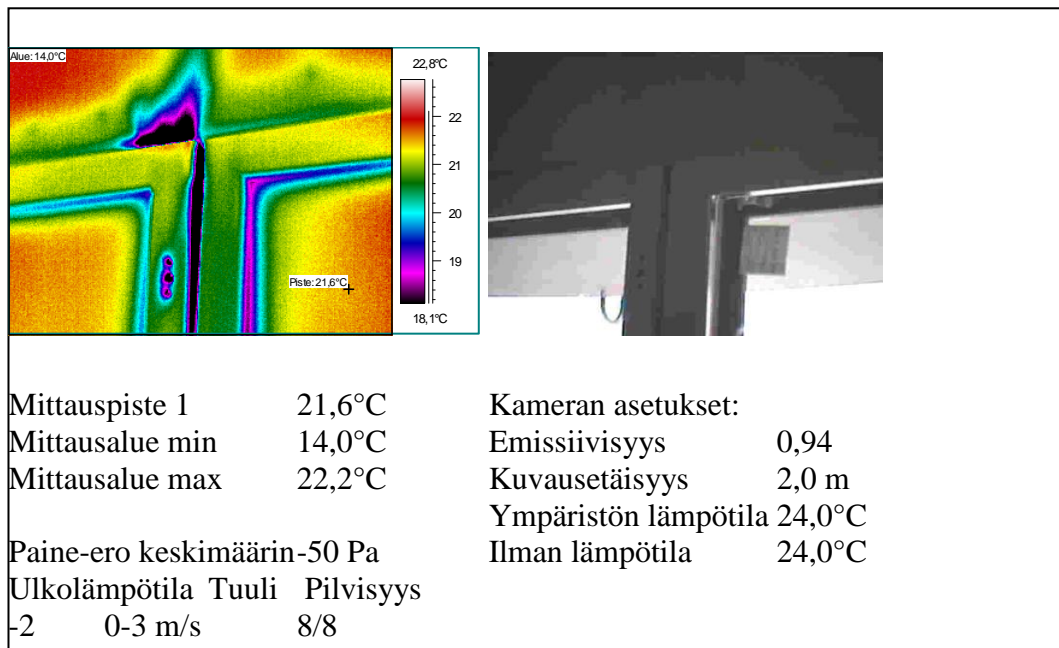
## Huoneisto 48.

**LÄMPÖKAMERAKUVA 3.** Kittauksessa vähäistä ilmavuotoa.

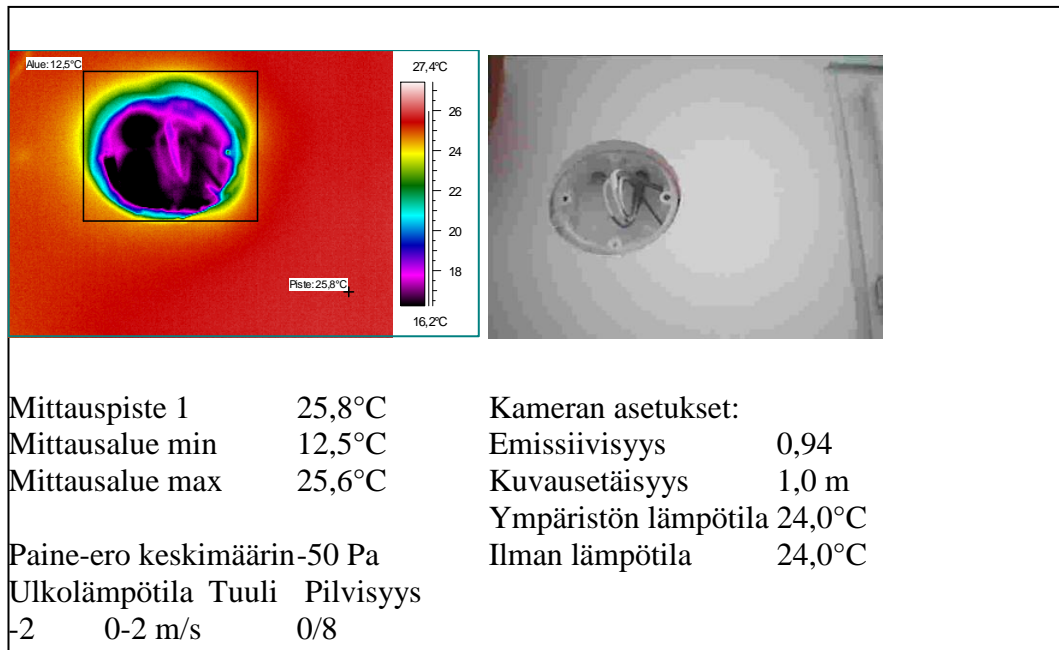
## Huoneisto 49.

**LÄMPÖKAMERAKUVA 4.** Sähkörasian liitos vuotaa.

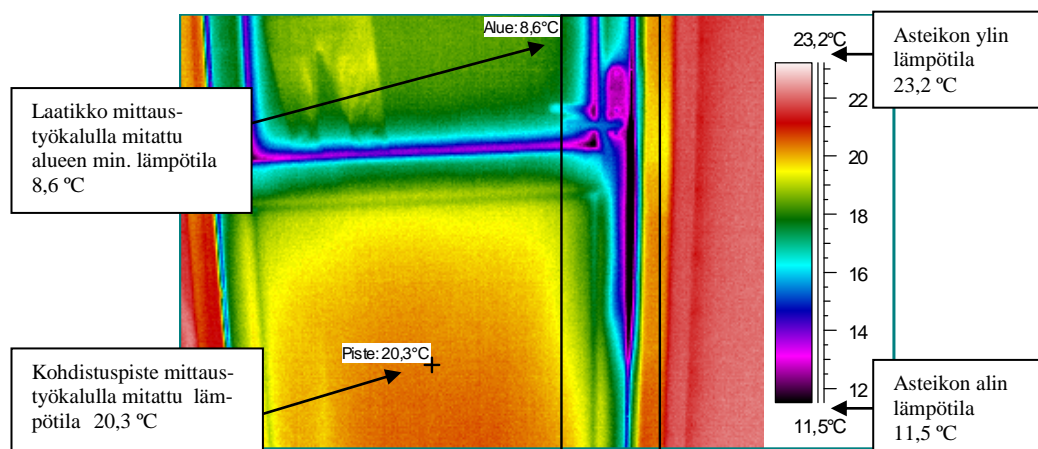
## Huoneisto 50.

**LÄMPÖKAMERAKUVA 5.** Ikkunatiivisteessä vähäistä ilmavuotoa.

## Huoneisto 38.

**LÄMPÖKAMERAKUVA 6.** Sähkörasian liitos vuotaa.**7.7 Lämpökamerakuvien tulkinta ja tarkkuus**

Lämpökuvista ilmenee kuvattujen pintojen välisiä lämpötilaeroja. Absoluuttisia lämpötiloja ei voi suoraan lukea lämpökuvista, koska tarkkuus vaihtelee kuvattujen pintojen todellisten emittanssien sekä kulloinkin käytetyn kamerakulman ja kuvausetäisyyden mukaan. (Paloniitty, 2004, 69-70.)

**KUVA 14.** Lämpökamerakuvan tulkinta.

## 7.8 Asumisterveysohjeen lämpötilaindeksi

Raja-arvoina pintalämpötilojen tulkinnassa käytetään Sosiaali-, ja terveysministeriön 2003 julkaisemaa ohjetta, Asumisterveysohje. Asumisterveysohjeen peruslähdekohtana on se, että sisäilman kosteus ei tiivistyisi sisäpinnoille. Oppaassa annetaan pistemäiselle poikkeamalle asuinhuoneistossa alin sallittu pintalämpötila tyydyttävällä tasolla + 11 °C. (Tämä on kastepistelämpötila, kun sisäilma on + 20 °C ja RH on 50%) Tätä ohjetta voidaan käyttää, kun ulkoilman lämpötila on - 5 °C ja tuulen nopeus on yli 5 m/s, ei kuitenkaan poikkeuksellisen kylmissä tai tuulisissa olosuhteissa.

Kun ulkolämpötilan arvo poikkeaa - 5 °C ± 1 °C, vian tai puutteen riskialttiutta eli vakavuutta kuvaamaan on käytetty asumisterveysohjeessa lämpötilaindeksiä, joka lasketaan sisälämpötilan ja ulkolämpötilan sekä vikalämpötilan mitatuista arvoista. Näin ollen erilaisissa olosuhteissa mitatut tulokset voidaan muuntaa yhteismittaisiksi, edellyttäen että muut asumisterveysohjeen mittausedellytykset täyttyvät.

$$TI = (T_{sp} - T_o) / (T_i - T_o) \times 100[\%] \quad (14)$$

TI on lämpötilaindeksi, %

T<sub>sp</sub> on sisäpinnan lämpötila, °C

T<sub>i</sub> on sisäilman lämpötila, °C

T<sub>o</sub> on ulkoilman lämpötila, °C

Seinän ja ulkovaipan liitoskohtien sekä läpivientien pistemäistä lämpötilaa kuvaava välttävän tason lämpötila indeksi on  $\geq 61\%$  ja hyvän tason  $\geq 65\%$ .

**Taulukko 3.** Asumisterveysohjeen indeksin raja-arvot sekä korjausluokitus. (Palmi, 2004, 73.)

Määritelmä		<b>Välttävä taso</b>	<b>Hyvä taso</b>
Sovelletaan		<i>Korjausrakentaminen</i>	<i>Uudisrakentaminen</i>
Indeksi pistemäisille vioille	0 - 61	61 - 65	65 – 100
Korjausluokka	1	2 tai 3	3 tai 4

Rakennuksen paine-erolla on vaikutus indeksilaskentaan, joka on huomioitava, jos rakennuksessa vallitsee normaalista poikkeava painesuhde. Standardin SFS 5132 mukaan tavoiteltava paine-ero lämpökuvauksen aikana on  $-5$  Pa. Tästä syystä lämpötilaindeksilaskentaa ei voida käyttää  $-50$  Pascalin alipaineessa kuvattuihin kohteisiin.

Tiiviysmittauksen yhteydessä tehtävät lämpökamerakuvaukset tulisi suorittaa siten, että rakennus kuvataan ensin 0-painetilanteessa. Tämän jälkeen rakennus kuvataan  $-50$  Pascalin alipaineessa. Näillä kuvauksilla saatuja tuloksia voidaan verrata, ja näistä saadaan helposti erotettua mahdolliset kylmäsillat ilmavuotokohdista.



## **8 TALOKOHTAINEN TIIVIYSMITTAUS**

Talokohtainen tiiviysmittaus suoritettiin elokuun 2010 alkupuolella. Talossa on yksi rappukäytävä, josta on kulku kaiken kaikkiaan 51:een asuntoon. Lisäksi rakennuksen ensimmäisessä kerroksessa on väestösuoja, tekninen tila sekä varastotiloja. Rakennuksessa on myös hissi. Rakennuksen ilmavuotoluku n50 ja ilma-  
vuotoluku vaipan pinta-alaa kohden  $q_{50}$  mitattiin alipainekokein. Ilmavuotopaik-  
koja ei selvitetty.

Mittaus kohteessa suoritettiin 13.8.2010

### **8.1 Mittauslaitteisto**

Paine-eron tuottamiseen ja ilmavuotoluvun määrittämiseen käytettiin Minneapolis BlowerDoor-laitteistoa (model 4.1, sarjanumero 17413-106, kalibroitu 31.8. 2009). Lämpötilamittaukset suoritettiin Waisala HMI41-mittarilla sekä mittapääl-  
lä HMP 42, (sarjanumero E2530001, kalibroitu 17.6. 2009). Paine-ero mittauksis-  
sa ensimmäisessä ja kahdeksannessa kerroksessa käytettiin TSI DPCALC-8710  
mittaria.



**KUVA 15.** Minneapolis BlowerDoor-laitteisto asennettuna huoneiston parveke oveen.

## 8.2 Mittausjärjestelyt

Ennen varsinaista mittausta kaikkien huoneistojen tulo- ja poistoilmaventtiilit teipattiin umpeen. Teippausta jouduttiin käyttämään, koska ilmanvaihtokoneiden ahtauksen vuoksi tulo- ja poistoilmakanavia ei saatu tukittua suoraan ilmanvaihtokoneesta. Lisäksi tuloilmakanavat sijaitsevat rakennuksen seinustalla, joten niitä oli mahdoton tulpata. Rakennuksen katolta poistokanavien päät olisi ollut helposti tulpattavissa. Liesituulettimien poistoilmakanavat teipattiin kiinni.



**KUVA 16.** Teipattu tuloilmakanava.



**KUVA 17.** Teipattu saunan tuloilmaventtiili.



**KUVA 18.** Teipattu poistoilmaventtiili.



**KUVA 19.** Teipattu liesituulettimen poistokanava.

Teippausten lisäksi huoneistojen vesilukot ja lattiakaivot täytettiin vedellä. Kaikkien huoneistojen ovet ja väliovet olivat auki mittauksen aikana. Huoneistojen ikkunoissa oli mittausajankohtana menossa sälekaihtimien asennus. Kaikki asennusreiät oli valmiiksi porattuna. Tämän johdosta teipattiin vielä kaikki reiät, joissa sälekaihtimet olivat vielä asentamatta.



**KUVA 20.** Sälekaihtimia varten poratut reiät teipattiin umpeen.

Rakennuksen katolta pussitettiin hissikuilun sekä porraskäytävän huippuimurit.



**KUVA 21.** Jätesäkeillä suljetut poistoilmakanavat rakennuksen katolla.

Ensimmäisen kerroksen yleistilojen ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmakanavat tulpattiin kanavien päistä rakennuksen seinustalta.



**KUVA 22.** Tulo- ja poistoilmakanavat tulpattuina.



**KUVA 23.** Yleistilojen ilmanvaihtokone.

Näissä valmistelemissa toimenpiteissä kuluu mittausajasta ajallisesti suurin aika. Varsinkin huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden tulppaaminen/teippaaminen on haastavaa.



### 8.3 Mittaustulokset

Ulko- ja sisäilman olosuhdemittaukset:

- Ulkolämpötila mittaushetkellä oli +24 °C
- Sisälämpötila +24 °C
- Tuulennopeudeksi mittauskohteessa arvioitiin 1-3 m/s
- Rakennus on tuulelle altis
- Painesuhteet rakennuksessa ennen mittausta:
- 1. krs 0 Pa, 4. krs 0 Pa, 8. krs -1 ... -2 Pa

Rakennuksen ilmatilavuudeksi mitattiin 8643 m<sup>3</sup>.

Rakennuksen vaipan alaksi sisämittojen mukaan mitattiin 2624 m<sup>2</sup>.

Seuraavassa taulukossa on esitettynä mittauspöytäkirjan mukainen yhteenveto mittaustuloksista.

**Taulukko 4.** Mittauspöytäkirja.

	Pa	m <sup>3</sup> / h	m <sup>3</sup> / h
1.	1.krs -30 -30 8.krs - 28	4100-4300	~4200
2.	1.krs -41 -40 8.krs - 38	5100-5300	~5200
3.	1.krs -50 -50 8.krs - 47	5900-6100	~6000
4.	1.krs -60 -60 8.krs - 57	6800-7000	~6900
5.	1.krs -65 -65 8.krs - 63	7100-7200	~7150

Rakennuksen ilmavuotoluku  $n_{50} = V^* / V$ , missä,

$V^*$  on ilmantilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron aiheuttamiseksi rakennuksen vaipan yli ( $m^3 / h$ )

$V$  on rakennuksen sisätilavuus ( $m^3$ )

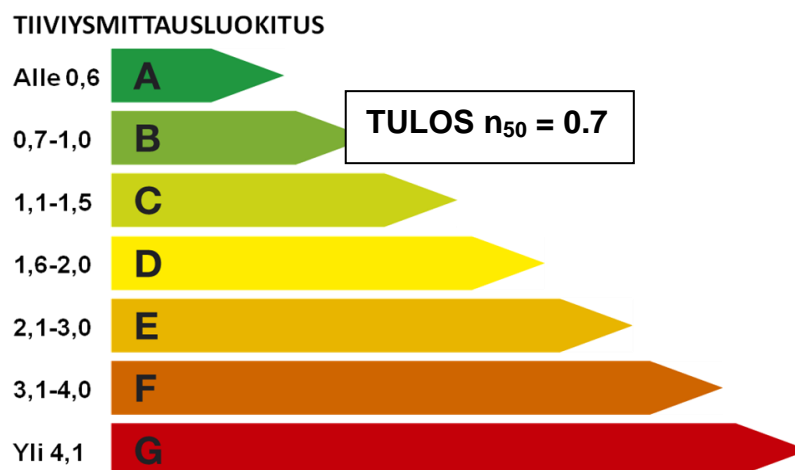
$$n_{50} = 6975 / 8643 = 0.7 \text{ 1/h.}$$

Rakennuksen ilmavuotoluku vaipan alaa kohti  $q_{50} = n_{50} \times V / A_E$  missä,

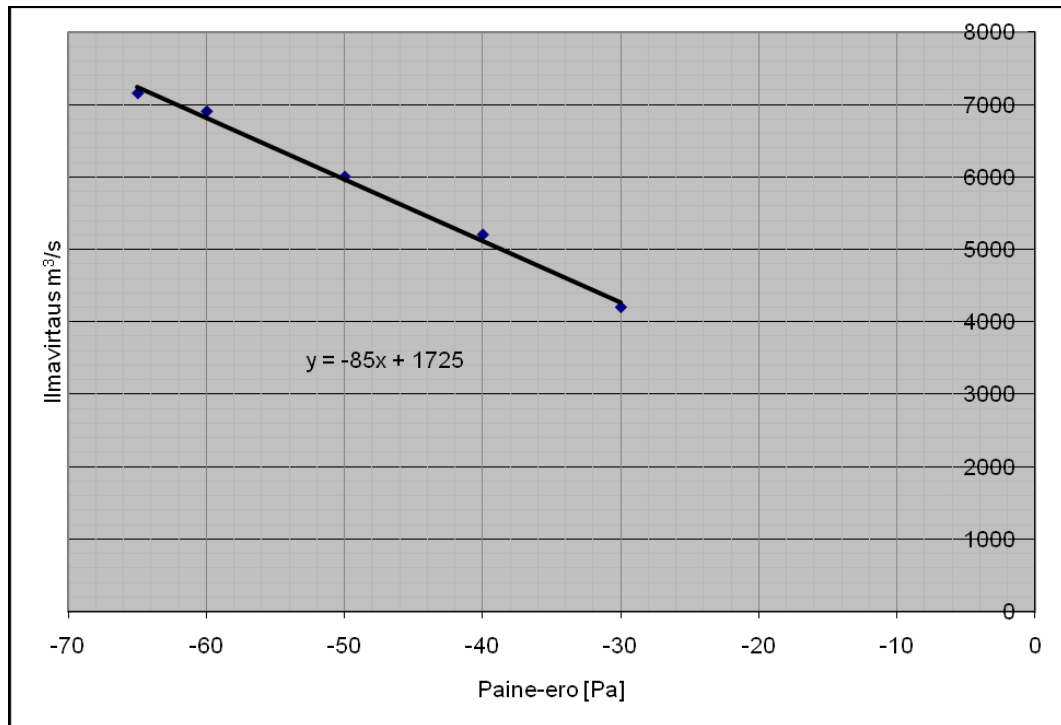
$A_E$  on rakennuksen vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna ( $m^2$ )

$$q_{50} \text{ on } 0.7 \times 8643 / 2624 = 2.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

Mitattu ilmavuotoluku 0.7 1/h sijoittuu tiiviysluokituksen B-luokkaan. Mittaus-tarkkuus käytetyllä menetelmällä on noin  $\pm 10\%$ .



**KUVA 24.** Tiiviysmittausluokitus. (Rateko, 2009)



**KUVA 25.** Mittauspöytäkirjan tuloksista tehty graafinen kuvaaja.

Liitteessä 26 on kokonaisuudessaan esitettyä kohteesta tehty tutkimusraportti.

## 9 TULOSTEN VERTAILU

Ilmavuotoluku  $n_{50}$  oli talokohtaisessa mittauksessa 0,7 1/h ja keskiarvo huoneisto-kohtaisissa mittauksissa oli 2,9 1/h. Parhaimmillaankin ilmavuotoluku  $n_{50}$  oli huoneistokohtaisissa mittauksissa vain 1,7 1/h.

Ilmavuotoluku  $q_{50}$  talokohtaisessa mittauksessa oli  $2.3 \text{ m}^3/(\text{hm})^2$  ja keskiarvo huoneistokohtaisissa mittauksissa oli  $2.2 \text{ m}^3/(\text{hm})^2$ .

Edellä esitettyjen tulosten vertailu osoittaisi  $q_{50}$ -luvun antavan paremmin vertailukelpoiset tulokset. Tässäkin tutkimuksessa seuraava RT-kortissa 80-10974 esitetty teoria pitää hyvin paikkansa:  $n_{50}$ - luku yleensä pienenee rakennuksen tilavuuden kasvaessa, vaikka vaipan ilmanpitävyys ei paranekaan. Tämä johtuu siitä, että sisätilavuuden kasvaessa yleensä myös suhde  $V/A_E$  kasvaa. Esimerkiksi pientaloissa suhde  $V/A_E$  vaihtelee tyypillisesti välillä 0,7 - 1,5, mutta kerrostaloissa suhde on tyypillisesti välillä 2,0 – 3,5, jos ilmanpitävyys mitataan koko portaan tai koko rakennuksen mittauksena. Tästä johtuen  $q_{50}$ - luku kuvaa paremmin ulkovaiipan todellista ilmanpitävyyttä suuremmissa rakennuksissa. (RT 80 - 10974, 2009 11.)

Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen ja Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorion tekemät tutkimukset kerrostaloissa osoittivat mitatuissa kerrostaloissa seuraavanlaiset ilmavuotolukujen keskiarvot: puukerrostalot (keskiarvo 2,9 1/h), betonielementtikerrostalot (1,6 1/h) kerrostalot, joissa välipohjat olivat paikalla valettuja (0,7 1/h) (Aho, Korpi, 2009, 9.). Näihin tutkimuksiin verrattuna tutkimuskohde, joka oli ns. sekarakenteinen kerrostalo, on tiiviydeltään varsin onnistunut.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

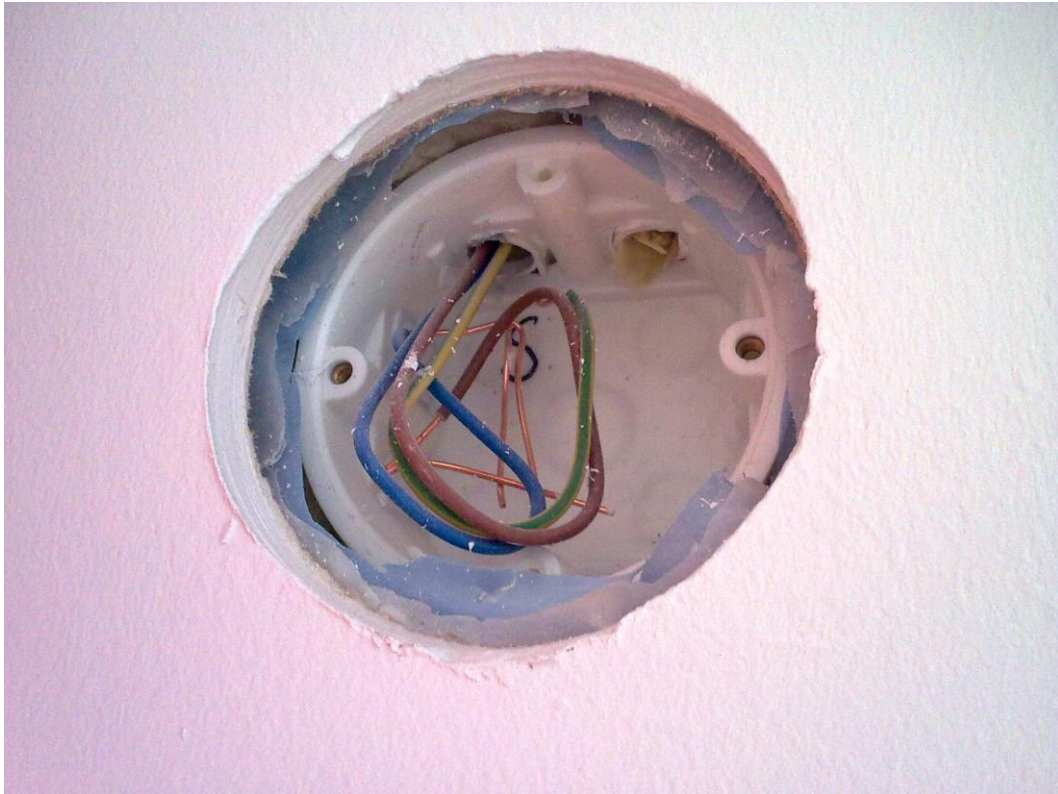
Suuren rakennuksen tiiviysmittauksen suorittaminen ei periaatteessa ole yhtään sen vaikeampaa kuin omakotitalon tiiviysmittauksen suorittaminen. Mittauksen suunnittelussa sekä ulkovaipan läpivientien tukkimisessa menee toki ajallisesti paljon kauemmin. Varsinkin ilmanvaihtokoneiden sulkeminen mittauksen ajaksi saattaa olla haastavaa, aivan kuten tämän lopputyön kohdetalossa. Ilmanvaihtokoneissa olisi hyvä olla sulkumekanismi, jolla laitteen tulo- sekä poistopuolet saataisiin kiinni. Mekanismi olisi kuitenkin syytä olla jonkinlaisen erikoisavaimen takana, ettei sulkupeltejä käyttäjien toimesta vahingossakaan saataisi käyttötilanteessa suljettua.

RT-kortin 80-10974 mukaan kerrostalojen ilmanpitävyys voidaan mitata joko yksittäisestä huoneistosta, yhdestä tai useammasta kokonaisesta portaasta tai koko rakennuksesta. RT-kortin mukaan voidaan yleisesti todeta, että kerrostalon ilmanpitävyydestä saadaan riittävän hyvä kuva sekä yksittäisten huoneistojen mittaamisella että koko portaan tai rakennuksen mittauksella.

Tässä tutkimuksessa niin sanotun sekarakenteisen kerrostalon mittaustulokset poikkeavat paljon, kun laskennassa käytetään ilmapuotolukua  $n_{50}$ . Sen sijaan jos tulosten laskennassa käytetään ilmapuotolukua  $q_{50}$ , saadaan jo suuruusluokaltaan samansuuntaisia tuloksia. Mittaustuloksia pidemmälle menevien johtopäätösten tekemiseen on tässä tutkimuksessa aika vähän, mutta se ainakin voitaneen todeta, että asiaa olisi syytä tutkia lisää.

Tiiviin rakennuksen toteuttaminen vaatii asioiden huomioimista jo suunnittelusta lähtien. Tämä ei toki vielä riitä, vaan sekä työnjohto ja työntekijät tulee sitouttaa ja opastaa siihen, mitä tiiviin rakennuksen tekeminen edellyttää. Loppujenlopuksi sen viimeisen silauksen vaipan tiiviydelle yleensä tekee rakennusmies teippirulla ja tiivistysmassa kädessä. Materiaalivalinnoissakin tulee huomioida materiaalien ominaisuudet ja kestävyys ajan saatossa entistä paremmin.

Uusien energiamääräysten myötä rakennusten tiiveyteen tulee suhtautua vielä kriittisemmin. Eristepaksuuksien kasvaessa ulkovaipparakenteet viilenevät entistään ja näin ollen talviaikaan rakennuksen sisältä ulospäin vaikuttava diffuusio ei saa viedä ylimääräistä kosteutta eristetilaan. Kondenssiongelman välttämiseksi tarvitaan siis erityisen tiivis höyrynsulku.



**KUVA 26.** Sähköläpivienti ulkovaipparakenteessa ei saisi näyttää tällaiselta.

## LÄHDELUETTELO

Aho Hanna, Korpi Minna, 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampereen teknillinen yliopisto.

Asumisterveysohje 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön -opas.

Hahtokari Tapani, 2009. Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa, hankesuunnitelma. VAMK.

Kauppinen Timo, Ojanen Tuomo, Kovanen Keijo, Laamanen Jarmo, Erkki Vähsöyrinki, 2009. Rakennusten ilmanpitävyys. Sisäilmayhdistys, raportti 27.

Paloniitty Sauli, 2004. Rakennuksen lämpökuvaus.

Rateko, 2009. Rakennusten ilmanpitävyys ja tiiviiden mittaus. Kurssimateriaali 11-12.11.2009 Hämeenlinna.

Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje, 2009. RT-kortti 80–10974.

Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method, 2001. SFS-EN 13829.