



# **ASUINRAKENNUSTEN ILMATIIVEYDEN JA ENERGIATEHOKKUUDEN TUTKIMINEN**

**Opinnäytetyö**

**Mika Kokko**

**Ympäristötekniikan koulutusohjelma**  
**Ympäristörakentaminen ja vesihuoltotekniikka**

Hyväksytty \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_

<b>SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO</b>		
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma		
Tekijä Mika Kokko		
Työn nimi Asuinrakennusten ilmatiiveyden ja energiatehokkuuden tutkiminen		
Työn laji Insinöörityö	Päiväys 4.11.2010	Sivumäärä 58 + 6
Työn valvoja Yliopettaja Merja Tolvanen	Yrityksen yhdyshenkilö Rakennusinsinööri Timo Auvinen	
Yritys Savon Lämpökuvaus Ky		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Asuinrakennusten energiatehokkuus on tullut tiukentuvien määräysten myötä yhä tärkeämmäksi, kun rakennuksia suunnitellaan ja rakennetaan. Energiatehokkuutta on parannettu lisäämällä lämmöneristyspaksuuksia ja lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Näiden näkökohtien ohella pitäisi ensisijaisesti parantaa energiatehokkuutta nostamalla ilmatiiveyden tasoa. Pienentämällä rakennuksen energiankulutusta, voidaan vähentää tehokkaasti siitä johtuvia ympäristöhaittoja ja vähentää elinkaaren aikaista ympäristökuormitusta. Tämä tarkoittaa käytännössä suunnittelemalla ja rakentamalla yhä tiiviimpiä rakennuksia. Ilmatiiveydellä pystytään varmistamaan rakennuksen energiatehokkuuden ohella myös terveellinen ja turvallinen rakenteiden toiminta ja sisäilmaston ilmanlaatu.</p> <p>Tämän insinöörityön aiheena oli tutkia asuinrakennusten ilmatiiveyttä ja ilmavuotoja sekä perehtyä niiden mittaamiseen, rakentamalla oma painekoelaitteisto. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää taustasyitä, minkä vuoksi ilmatiiveysmittauksia rakennuksille yleensä tehdään ja mitkä ovat periaatteet mittauksen suorittamiselle. Painekoelaitteiston rakentamisella opittiin käyttämään laitteistossa tarvittavia mittalaitteita ja itse painekoelaitteistoa. Rakennuksen ilmavuotoluku määritetään painekoelaitteistolla, jolla kuvataan ilman kulkeutumista rakennusvaipan lävitse mm. rakojen, lohkeamien ja saumojen kautta. Laitteiston testaaminen suoritettiin tekemällä rakennusten ilmatiiveyden kenttämittauksia rakennetyypiltään ja rakentamisvuodeltaan erilaisissa tutkimuskohteissa, joista saadaan myös käytännön ilmatiiveyden tutkimustuloksia. Työssä perehdyttiin myös kansallisella tasolla vallitsevaan ilmatiiveysmittauksen markkinatilanteeseen.</p> <p>Työn tuloksena saatiin käytännön ilmatiiveyden tutkimustuloksia viidestä eri rakennuksesta. Rakennetulla omalla painekoelaitteistolla saatiin kokemusta: laitteistokokoonpanon mittalaitteiden käyttämisestä, mittausjärjestelyiden suorittamisesta sekä asiantuntevasta rakenteiden ja ilmatiiveyden välisestä yhteydestä rakennetekniikassa.</p>		
Avainsanat ilmatiiveys, ilmavuodot, energiatehokkuus, painekoelaitteisto		
Luottamuksellisuus julkinen		

<b>SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b>		
Degree Programme		
Environmental Technology		
Author		
Mika Kokko		
Title of Project		
Research on Air-Tightness and Energy Efficiency in Residential Buildings		
Type of Project	Date	Pages
Final Project	4 November 2010	58 + 6
Academic Supervisor	Company Supervisor	
Mrs Merja Tolvanen, Principal Lecturer	Mr Timo Auvinen, Construction Engineer	
Company		
Savon Lämpökuvaus Ky		
Abstract		
<p>Residential energy efficiency has become increasingly important due to tightening regulations when designing and constructing buildings. Energy efficiency has been improved by using thicker thermal insulators and the efficiency of heat recovery. Besides these aspects, the level of air-tightness should primarily be used to improve energy efficiency. By lowering energy consumption, adverse effects on the environment can be reduced effectively and reduce the damage to the environment during the life cycle of buildings. In practice, this means, designing and building more and more compact buildings. With air-tightness the building's energy efficiency, as well as healthy and safe operation of the structures and indoor air quality can be ensured.</p> <p>The aim of this thesis was to examine air-tightness and air leakages and their measurement in residential buildings by building a fan pressurization apparatus. First, literature was studied to find out why these measurements are generally made and what are the principles for carrying out the measurements. Then usage of the necessary instruments for the measurement itself was studied by constructing the fan pressurization method hardware. Then hardware testing was carried out by doing measurements in various buildings of different age and structural type, which also provided practical air-tightness results. Finally, this thesis also explored the existing situation of air-tightness measurements on the market at national level.</p> <p>As a result of the practical work, research results on air-tightness were obtained from five different buildings. With the self-built fan pressurization apparatus it was possible to get proper usage information from the hardware configuration, experience from carrying out the measurement procedure and from the connection between the structures and air-tightness in structural engineering.</p>		
Keywords		
air-tightness, air leakages, energy efficiency, air pressurization apparatus		
Confidentiality		
public		

## **ALKUSANAT**

Tämä opinnäytetyö tehtiin tutkimuksena kehittää Savon Lämpökuvaus Ky:lle asuinrakennusten ilmatiiveyden mittaamiseen käytettävä menetelmä ja selvittää käytännössä tehtävien kenttämittauksien avulla sen toimivuus ja luotettavuus käytännössä. Työ kirjallisen osuuden tekeminen aloitettiin talvella 2009 ja alkukesästä 2010 rakennettiin mittauslaitteisto, jonka jälkeen etsittiin sopivia tutkimuskohteita laitteiston toimivuuden testaamiseksi kenttämittauksissa.

Haluan esittää kiitokseni Savon Lämpökuvaus Ky:lle ja rakennusinsinööri Timo Auviselle mahdollisuudesta tehdä tämä työ ja suuresta avustuksesta työn eri vaiheissa. Kiitän myös työn ohjaajaa yliopettaja Merja Tolvista. Erityiset kiitokset esitän läheisilleni, kannustuksesta opintojeni kuin myös opinnäytetyön eri vaiheissa.

4.11.2010

**Mika Kokko**

# SISÄLLYS

<b>KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT .....</b>	<b>7</b>
<b>1. JOHDANTO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. ILMAVUODOT RAKENNUKSESSA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Ilmavuotojen merkitys .....	9
2.2 Ilmavuotojen muodostuminen ja vaikutukset rakennuksessa .....	10
2.3 Ilmavuotojen vaikutus sisäilmastoon.....	12
<b>3. RAKENNUSTEN ILMATIIVEYS .....</b>	<b>14</b>
3.1 Yleistä ilmavuodoista .....	14
3.2 Rakennuksen painesuhteet .....	16
<b>4. ILMATIIVEYS NYKYISISSÄ JA UUSISSA PIEN- JA KERROSTALOISSA.....</b>	<b>18</b>
<b>5. ILMATIIVIIDEN RAKENNERATKAISUT .....</b>	<b>21</b>
5.1 Rakenteellisen ilmatiiveyden toteuttaminen .....	21
5.2 Rakenneosien ilmatiiveys.....	22
5.2.1 Puurakenteiset asuinrakennukset .....	22
5.2.2 Massiivirunkoiset asuinrakennukset.....	25
5.3 Ilmansulkukerroksen läpiviennit.....	29
5.3.1 LVIS-läpiviennit .....	29
5.3.2 Hormiläpiviennit .....	31
<b>6. RAKENNUSTEN ILMAVUOTOLUVUN MITTAUS .....</b>	<b>33</b>
6.1 Ilmavuotoluvun mittausmenetelmät.....	33
6.2 Paineoemenetelmän suorittaminen.....	35
6.3 Paineokeessa käytettävät mittauslaitteistot .....	37
6.3.1 Paineoke, jossa käytetään erillistä puhallinta.....	39
6.3.2 Paineoke, jossa käytetään rakennuksen omaa ilmanvaihtojärjestelmää.....	42
6.4 Paineoemenetelmän ilmavuotolukujen laskenta .....	43
6.4.1 Ilmavuoto- ja ilmanläpäisyyluku.....	43
6.4.2 Rakennuksen tai tutkittavan alueen ilmatilavuus .....	45
<b>7. MARKKINAKATSAUS ILMATIIVEYSMITTAUKSIIN .....</b>	<b>46</b>
<b>8. ILMATIIVEYDEN KENTTÄMITTAUKSET .....</b>	<b>48</b>
8.1 Oma laitteistokokoonpano.....	48

8.2 Mittauksen suorittaminen .....	49
8.3 Kohteiden valitseminen.....	50
9. KOHTEIDEN TULOKSET .....	51
9.1 Mittauspöytäkirja ja tiedonkeräyslomake.....	51
9.2 Kohteiden ilmavuotoluvut ja -käyrät .....	52
9.3 Tulosten tarkastelu.....	54
10. YHTEENVETO.....	55
LÄHTEET .....	57
LIITE 1	Piirros rakennetusta painekoelaitteistosta
LIITE 2	Mittauspöytäkirja ja tiedonkeräyslomake rakennuksesta 1

## KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia pitoisuuseroja ja osapaine-eroja aina kohti pienempää pitoisuuden ja osapaineen suuntaan. Diffuusiossa kaasun siirtymissuunta on korkeammasta alempaan pitoisuuteen. /1, s. 56./
Höyrynsulku	Rakennekerros, jonka pääasiallisena tarkoituksena on estää sisäilman vesihöyryn haitallinen siirtyminen diffuusiolla rakennuksen vaipparakenteisiin. /1, s. 57/
Ilmansulku	Ainekerros, jonka tehtävänä on estää haitallisten ilmavirtausten (konvektiovirtausten) pääseminen rakenteen lävitse. Kerroksellisissa rakenteissa tarvitaan rakenteen sisäpinnan lähellä myös riittävän vesihöyryvastuksen omaava höyrynsulku. Yleensä sama ainekerros muodostaa sekä ilman- että höyrynsulkukerroksen. /1, s. 57/
Ilmavuotoluku, $n_{50}$	Rakennusvaipan lävitse vaihtuva rakennuksen ilmatilavuus kerran tunnissa ilmavuotoina 50 Pa (Pascal) paine-erolla [1/h]. Ilmavuotoluku kuvaa rakennusvaipan ilmatiiveyttä. /2, s. 2/
Konvektio	Konvektiolla tarkoitetaan paine-eroista muodostuvaa ilman virtausta. Konvektion suunta on suuremmasta paineesta pienempään paineeseen päin. Ilmavirtaus kuljettaa mukanaan lämpöenergiaa ja kosteutta. /1, s. 56/

## 1. JOHDANTO

Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyyteen – ilmatiiveyteen ei ole kiinnitetty merkittävästi huomiota aivan viime vuosia lukuun ottamatta. Talovalmistajien ja rakentajien huomio kiinnittyy energiatehokkuuteen ja sitä kautta energiankulutuksen hallitsemiseen ja mahdollisesti sen pienentämiseen. Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveydessä esiintyvät puutteet aiheuttavat monia seurannaisvaikutuksia rakenteille sekä asukkaille. Rakennuksen ulkovaipan läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eli ilmavuodot aiheuttavat välillisesti ja välittömästi monia haittoja. Ilmavuotojen vähentäminen parantaa sisäilmaston laatua ja sen kautta asumisviihtyisyyttä, kun ulkoilman epäpuhtaudet esim. pienhiukkaset eivät pääse rakennuksen sisälle ja ilmavuodot eivät aiheuta vedon tunnetta. Hyvällä ilmatiiveydellä voidaan pienentää kosteusvaurioiden syntymisriskiä ja parantaa ilmanvaihdon toimivuutta ja säädettävyyttä. Kosteusvaurioista ja niissä syntyvistä homekasvustoista voi kulkeutua ilmavuotojen mukana sisäilmaan homeitiöitä ja näin aiheuttaa terveysriskin asukkaille. Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveys vaikuttaa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan sekä niiden pitkäaikaiskestävyyteen. Ilmanvaihdon riittävä ja suunniteltu toiminta edellyttää rakenneosien hyvää ilmatiiveyttä. /2; 3./

Rakennus- ja kiinteistöala kuluttaa hyvin merkittävän osan tuotetusta energiasta. Rakennuksen energiatehokkuuden ja lämmitysenergiankulutuksen säästötavoitteet ovat näin ollen nykyään hyvin merkittäviä jo suunnitteluvaiheessa, jossa pyritään optimoimaan vaipparakenteiden lämmöneristepaksuutta ja riittävää ulkovaipan ilmatiiveys. Näillä asioilla pyritään parantamaan energiankulutuksesta johtuvia ympäristöhaittoja ja vähentämään rakennuksen elinkaaren aikaista ympäristökuormitusta. /2; 3./

Tämän työn tavoitteena on perehtyä rakennusten ilmavuotojen mittaamiseen ja näin painekoelaitteiston rakentamiseen. Tutkimuksessa selvitetään taustasyitä, minkä vuoksi ilmavuotomittauksia rakennuksille yleensä tehdään ja mitkä ovat yleiset periaatteet mittauksen suorittamiselle. Työn päätavoite on perehtyä huolellisesti ilmavuotomittauksissa käytettävien mittalaitteiden tuntemiseen ja sitä kautta laitteistokokoonpanon käyttämiseen. Laitteiston valmistuttua suoritetaan rakennusten ilmatiiveyden kenttämittauksia, joilla varmistetaan laitteiston soveltuvuus ja käytettävyyttä kyseisissä mittauksissa. Työssä perehdytään myös kansallisella tasolla ilmavuotomittausten vallitsevaan markkinatilanteeseen, jonka perusteella voidaan luoda uusi liiketoiminta osa-alue yritykselle. Työn perusteella pystytään rakentamaan ilmavuotomittauslaitteisto ja harjoittamaan asuinrakennuksille kohdistettua ilmatiiveyden palveluliiketoimintaa.

## 2. ILMAVUODOT RAKENNUKSESSA

### 2.1 Ilmavuotojen merkitys

Rakennuksen hyvällä ilmatiiviydellä voidaan parantaa sisäilmaston ilmanlaatua. Epäpuhtauksien, haitallisten aineiden ja homeiden kulkeutuminen rakennusvaipan rakenteista ja maaperästä voidaan estää tehokkaasti. Lisäksi asumisviihtyvyys paranee huomattavasti, koska vedon tunne vähenee. Ilmatiiviydellä parannetaan lisäksi huomattavasti rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Rakennuksen sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin ja toisaalta, kylmä ulkoilma ei jäähdytä rakenteita, jolloin pienennetään materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin syntyvää haitallista kosteuden tiivistymisriskiä. Hyvin toimivalla ilmanvaihdolla on hyvin suuri merkitys tiiviissä ja energiatehokkaassa rakennuksessa. Kun ilmanvaihto on riittävä ja tasapainotettu oikein, voidaan luoda hyvät edellytykset viihtyisälle ja terveelliselle sisäilmastolle. Tämä edellyttää, että ilmanvaihtojärjestelmää huolletaan säännöllisesti, vaihtamalla riittävän usein tuloilmasuodatin sekä tarkastetaan kanavien tiiveys. Ilmatiiviissä rakennuksessa ilmanvaihdon lämmöntalteenotosta saadaan suurin mahdollinen hyöty energiatehokkuuden kannalta, koska lähes kaikki ilma virtaa rakennukseen ja sieltä pois suurelta osin ilmanvaihdon lämmöntalteenoton eikä ilmavuotojen kautta. /2, s. 3./

Rakennuksen ilmavuodot ja ilmatiiviyys ovat hyvin tärkeitä, kun tarkastellaan ja määritellään rakennuksen lämpöhäviöiden suuruutta ja energiankulutusta. Rakennusvaipan hyvällä ilmatiiviydellä voidaan parantaa energiatehokkuusluokkaa energiatodistuksessa, ilmatiiviydellä voidaan myös kompensoida rakennuksen muita lämpöhäviöitä. Ensisijaisesti tulisi käyttää energiatehokkuutta parantavana tekijänä ilmatiiviyden tasoa, alentamatta rakennusvaipan lämmöneristyskykyä tai lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Rakennuksen vuotoilmamäärällä on huomattava vaikutus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Esimerkiksi pientaloissa laskennallisesti kokonaisenergiankulutus lisääntyy keskimäärin 4 % jokaista  $n_{50}$ -luvun kokonaisyksikön lisäystä kohti. Ilmavuotoluku ( $n_{50}$ ) määritetään, kun rakennusvaipan lävitse vaihtuu rakennuksen ilmatilavuus kerran tunnissa ilmavuotoina, kun sisä- ja ulkotilan välillä on 50 Pa paine-ero. Rakentamismääräysten 2010 mukainen ilmanvuotoluvun suunnitteluarvo on 4,0 l/h. Tällaisessa pientalossa kokonaisenergian kulutus on 6–20 % suurempi kuin erinomaisen ilmapitävyystason omaavassa ( $n_{50} = 1,0$  l/h) pientalossa. On huomioitava myös, että merkittävästi rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen vaikuttaa asukkaiden asumistottumukset ja ilmanvaihdon toiminta. /2, s. 3–4./

Rakennusten ilmatiiveys katsotaan osaksi rakennuksen toimivuuden varmistamista (ToVa-menettelyä) /4./ Tässä menettelyssä rakennuksen ilmatiiveys ja energiatehokkuus katsotaan osaksi suunnittelun ja rakentamisen järjestelmällistä tavoitteiden ja vaatimusten asettelua. Ilmatiiveyden kannalta katsottuna keskeinen asia on määritellä yksiselitteisesti ne tavoitteet ja vaatimukset, jotka ovat sidoksissa toisiinsa tai muuten ovat hyvin merkittäviä. Lisäksi tärkeää on asettaa yhteisiä tavoitteita, jolloin voidaan välttää ja ennaltaehkäistä mahdollisia ongelmatilanteita ja mahdollisuuksien mukaan luoda optimaalisia tavoitteita ja näkökulmia. Ilmatiiveys ja sen mittaaminen katsotaan yhdeksi varmistusmenetelmäksi, jolla voidaan todeta rakennuksen sisäilmaston, lämmöneristyksen ja rakenteellisen ilmatiiviuden yhdessä muodostamaa kuvaa rakennuksen toimivuudesta ja laadullisesta lopputuloksesta.

Rakennuksen hyvän ilmatiiviuden varmistamiseksi ja saavuttamiseksi on syytä kiinnittää huomiota rakennusvaiheen aikana suoritettavien työsuorituksien ja hyvän rakennustavan noudattamiseen. Työmaavalvonnalla pyritään ennaltaehkäisemään ja korjaamaan rakennusvaiheessa tapahtuvat virheet ja puutteet. Työvaiheiden asianmukaisella suorittamisella voidaan saada aikaiseksi ja varmistaa laadullisesti hyvän lopputuloksen saavuttaminen. Kuitenkin kaikkein tärkein on, että jo suunnitteluvaiheessa rakennusvalvontaa suorittavat ja suunnittelijat käyvät vuoropuhelua omasta näkökulmastaan ilmapitävyyden toteuttamiseksi. Kriittiset ongelma-kohteet tulisi jo suunnittelu vaiheessa ottaa huomioon, mutta tarvittaessa joudutaan suorittamaan toimenpiteitä rakenteellisen ilmatiiviuden parantamiseksi.

## **2.2 Ilmavuotojen muodostuminen ja vaikutukset rakennuksessa**

Rakennuksen painesuhteet ja rakenteiden tiiveys tulee suunnitella ja toteuttaa niin, että epäpuhtauksien siirtymistä ja kulkeutumista voidaan vähentää. Sisäilman haitallisen konvektion estämiseksi on rakennuksen vaipan liitoksien, saumojen ja muiden yksityiskohtien oltava niin tiiviitä vallitsevien ilmavuotojen osalta, että rakennus on pääasiallisesti mahdollista pitää alipaineisena. Ulkoseinän ja sen eri kerrosten ja niihin liittyvien rakenteiden ja ulkoseinän saumojen ja liitosten ilmatiiveys ja vesihöyryvastus on oltava sellainen, ettei seinän kosteuspitoisuus muodostu haitalliseksi sisäilman vesihöyryn diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. /3, s. 7./

Diffuusio on ilmiö, jossa kosteus eli vesihöyrymolekyylit liikkuvat satunnaisesti ilmassa tai huokoisen aineen huokosissa. Diffuusio pyrkii tasoittamaan vesihöyryn osapaineen/vesihöyrypitoisuuden paikallisia eroja höyryn siirtyessä kohti pienempään pitoisuutta/osapainetta. Tässä tapauksessa ilman kosteuserot esim. ulko- ja sisätilan välillä pyrkivät

tasoittumaan. Kaikkein eniten diffuusion suuntaan vaikuttava tekijä on tilojen välillä vallitsevat kosteuserot. Yleensä diffuusion suunta on lämpimästä kylmään päin. /1, s. 56./

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen mukana. Ilman virtaukset johtuvat ilmanpaine-eroista, joka virtaa aina pienenevän kokonaispaineen suuntaan. Konvektio on yleisesti lämmön siirtymistä nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Konvektio aiheutuu muodostuvista lämpötilaeroista, joka aiheuttaa aineen tiheyden muuttumisen. Kuuma ”harva” aine kohoaa ylöspäin painovoimakentässä, kun taas sitä viileämpi aine laskeutuu alaspäin. Yleisesti aineen lämpötilan kohotessa sen tiheys pienenee, vastaavasti lämpötilan laskiessa tiheys kasvaa. /1, s. 56./

Lämpimään sisäilmaan sitoutunut kosteus voi kulkeutua konvektion vaikutuksesta ilmavuotokohdista ulospäin ja näin aiheuttaa etenkin talvella suuren lämpötilaerojen vuoksi kosteuden tiivistymisriskin ja mahdollisen kosteusvaurion syntymisen rakenteeseen. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta suurin merkitys kylmänä vuodenaikana on reikien, rakojen, halkeamien yms. läpi sisältä ulos ilman paine-erojen vaikutuksesta tapahtuvilla ilmavirtauksilla. Kyseiset virtaukset epätiivien rakennekohtien (ilmavuotojen) kautta voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisia kosteusmääriä verrattaessa diffuusioon. Rakenteissa vesihöyry tiivistyy (kondensoituu) aina kovalle pinnalle, joka on huomattavasti kylmempi kuin ympäröivän ilman lämpötila, kun vesihöyryn kyllästymiskosteus eli kastepiste ylittyy. Tavallisesti tiivistyvää kosteutta aiheuttavat lämpimään tilaan rajoittuva rakenteen sisäpinta esim. kylmäsillat, höyrysulun puutteellinen tai väärä sijainti ja rakenteen höyrysulussa olevat reiät, jotka mahdollistavat konvektiovirtauksen sisältä ulos. /1, s. 56./

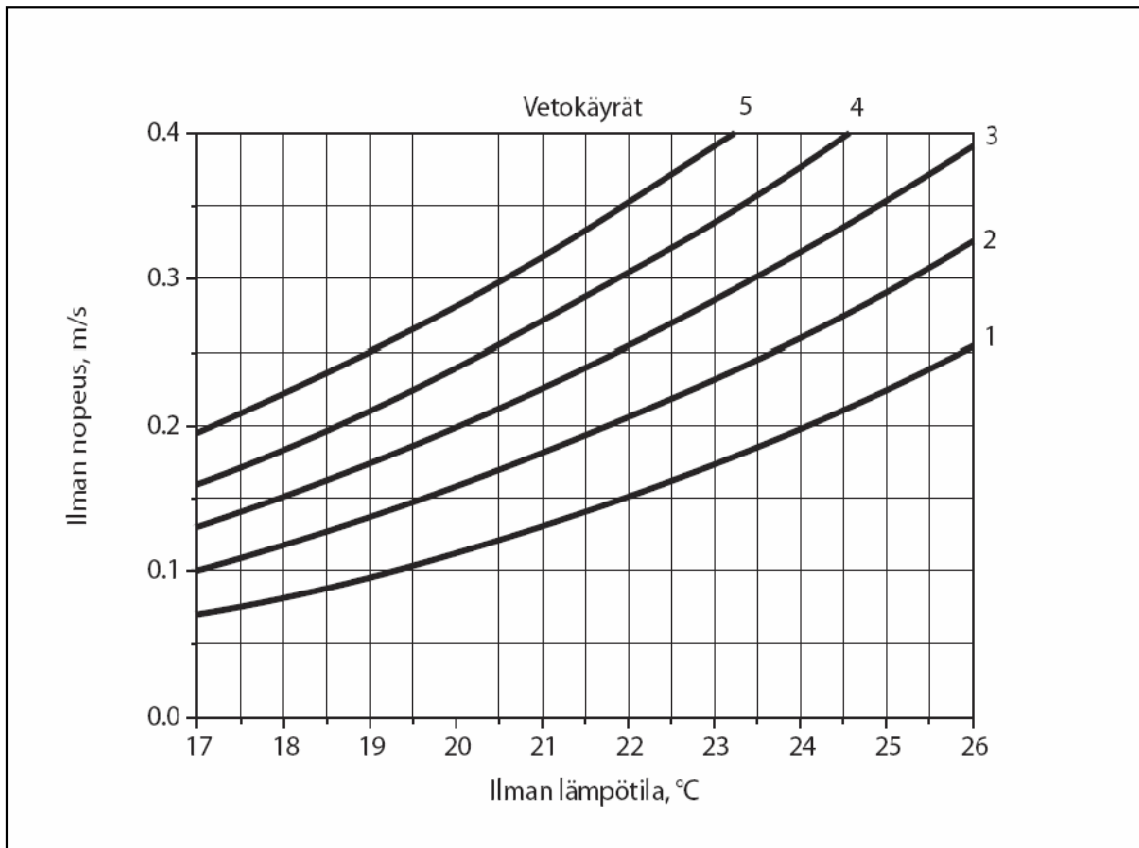
Diffuusion ja konvektion haitallisten vaikutusten minimoimiseksi ja estämiseksi, tulevat rakenteet rakennuksen sisäpuolelta tehdä mahdollisimman vesihöyryä läpäisemättömiksi. Rakenteet tulee lisäksi suunnitella niin, että rakenteen vesihöyrynvastus pienenee lämpimästä sisätilasta kylmempään ulkotilaan mentäessä. Rakenteen lämpimällä puolella käytetään yleensä vesihöyryä riittävästi läpäisemättömä kerrosta eli höyryn- ja ilmansulkua. Höyry- ja ilmatiiviskerros estää samalla rakenteen läpi tapahtuvat ilmavuodot ja mahdolliset konvektiokosteudesta aiheutuvat kosteusvauriot, mikäli höyrynsulkukerroksen läpiviennit ovat huolellisesti tiivistetyt. Rakennuksessa ja sen tiloissa vallitseva alipaine vähentää rakenteisiin kohdistuvaa vesihöyrypainetta ja siten kondensoitumisvaaraa. /3, s. 15–16./

### 2.3 Ilmavuotojen vaikutus sisäilmastoon

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että oleskeluvyöhykkeen viihtyisä huone-  
lämpötila voidaan ylläpitää käyttöaikana niin, ettei energiaa käytetä tarpeettomasti /5, s. 3/.  
Tässä puolestaan palataan taas ilmavuotojen merkitykseen. Ilmatiiveyden ollessa rakennuk-  
sessa heikko, joudutaan rakennuksen sisälämpötilaa pitämään korkealla, jotta haluttava huone-  
lämpötila voidaan pitää yllä. Sisälämpötilan nostaminen puolestaan kasvattaa energiaku-  
lutusta ja näin heikentää sen energiatehokasta käyttöä. Rakennuksen vetoisuudella ja sen pois-  
tamisella voidaan vaikuttaa merkittävästi rakennuksen terveellisen, turvallisen ja viihtyisän  
sisäilmaston luomisessa. Pitkäaikainen veto ja viileät lattia- ja seinäpinnat voivat aiheuttaa  
terveyshaittaa.

Rakennusten ilmavuodot aiheuttavat välittömiä haittoja ihmisen terveydelle sekä viihtyisyy-  
delle. Etenkin talvisin kylmät ilmavuodot aiheuttavat huonetiloissa paikallista lämpötilan ale-  
nemista ja vedon tunnetta. Hallitsemattomat ilmavuodot aiheuttavat normaalia voimakkaam-  
paa lämmön siirtymistä ihmisen kehosta huoneilmaan, mikä puolestaan aiheuttaa ns. epämiel-  
lyttävän vedon tunteen. Epäviihtyisyyttä ilman nopeuden ja huoneilman lämpötilan välillä  
voidaan arvioida kuvan 1 eri vetokäyrien avulla. Lämmön siirtymiseen ilman liikkeen lisäksi  
vaikuttaa merkittävästi rakennuksen sisäpintojen lämpösäteily. Mikäli sisäpintojen pintaläm-  
pötilat ovat alhaisia, lämpöä ei siirry säteilemällä, vaan pinta sitoo itseensä lämpöenergiaa.  
Tämä vaikuttaa rakennuksen sisäilmaston lämpöolosuhteiden heikkenemiseen ja kylmien pin-  
tojen esiintyvyyteen. Kylmät pinnat muodostuvat hyvin usein ilmavuodoista ulkoseinän ja  
alapohjan liitoksissa, ikkunoiden ja ovien liitoskohdissa, LVIS-läpivienneissä tai kylmäsil-  
loissa.

Epäviihtyisyyttä aiheuttavat kylmät ilmavuodot voivat aiheuttaa välillisesti sisäilman laadun  
heikkenemistä. Ilmavuotojen välityksellä voi rakennus- ja sisustusmateriaaleista kulkeutua  
epäpuhtauksia sisäilmaan, kun rakennus on ilmatiiveydeltään heikko. Saumoista, raoista, loh-  
keamista ja muista rakenteellisesti ilmatiiviydeltään epätiiviestä kohdista voi kulkeutua leiju-  
vaa pölyä sekä kevätaikaan siitepölyä. Lisäksi ilmavuodot voivat aiheuttaa rakenteeseen kos-  
teuden tiivistymisriskin, jolloin suotuisissa olosuhteissa voi syntyä homekasvustoa. Tällöin  
vuotoilma voi kuljettaa homeitiöitä mukanaan rakennuksen sisäilmaan ja näin aiheuttaa hai-  
tallisia terveysvaikutuksia asukkaille.



Kuva 1. Vetokäyrät kuvaavat aiheuttamaa epäviihtyvyyttä ilman nopeuden ja huonetilan lämpötilan riippuvuudesta /5, s. 14./

Kuvassa 1 esitetyistä vetokäyristä voidaan havaita, että mitä suurempi huonelämpötila on, sitä suurempi ilman nopeus saa olla. Vetokäyrä 1 edustaa vedontunteeltaan erittäin hyvää tasoa (vedontunne erittäin pieni) ja käyrä 2 hyvää tasoa. Näiden perusteella vetokäyrä 5 kuvaa voimakasta vetoa.

### 3. RAKENNUSTEN ILMATIIVEYS

#### 3.1 Yleistä ilmavuodoista

Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa D3, ”Rakennusten energiatehokkuus” on esitetty rakennuksen ilmavuotoluvun vertailuarvot, jotka kuuluvat rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskennan piiriin. Vuoden 2010 rakentamismääräyksissä ilmavuotoluvun vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään arvoa 2,0 l/h. Rakennuksen ilmavuotoluvun suunnitteluarvona käytetään rakentamismääräyksissä arvoa 4,0 l/h. Suunnitteluarvoa pienemmän ilmavuotoluvun käyttämiseksi suunnittelussa vaaditaan, että ilmatiiveys todetaan ja varmennetaan mitaamalla tai muulla menettelyllä. Yksi mahdollinen tapa rakennuksen ilmapitävyyden varmistamiseksi on ilmoitusmenettely. Ilmoitusmenettelyssä talotoimittaja voi todentaa talotyypikohtaisesti ilmavuotoluvun arvoja. Toinen mahdollinen toteutustapa on kohdekohtainen ilmavuotoluvun mittaus. Kummassakin tapauksessa tulee kyseeseen ilmavuotoluvun määrittämisen painekoemenetelmällä standardin mukaisesti. Paineekoemenetelmä ei itsessään anna kuvaa siitä, miten ilmavuotokohdat ovat sijoittuneet rakennukseen tai sen osaan. Vuotokohtia voidaan tutkia käyttäen esim. lämpökamerakuvausta tai merkkisavumenetelmää.

Ilmatiiviissä rakennuksessa voidaan hallita hyvin rakennuksen ilmanvaihtoa ja sisäilman laatua. Ikkunan raosta tuleva vuotoilmavirta sisältää epäpuhtauksia, kun taas ilmanvaihtojärjestelmän kautta tuleva korvausilma voidaan suodattaa epäpuhtauksista. Käytettäessä koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää on sen käyttö ja lämmöntalteenotto tehokkaampaa, kuin ilma poistuu ilmanvaihtoventtiilien kautta. Rakennuksen alapohjan ilmatiiveydellä on suuri merkitys, koska maaperässä esiintyvien radonin ja mikrobien kulkeutuminen sisäilmaan voidaan estää. Tiiviissä rakennuksissa ilmanvaihtolaitteiston tulee olla tasapainotettu ja riittävän tehokas, koska tällöin ilma ei vaihdu muita reittejä pitkin (vuotoilmana). /6, s. 7–8./ Taulukossa 1 esitetään tyypillisiä ilmavuotolukuja riippuen ilmatiiveyden huomioimisesta suunnittelussa ja rakentamisessa.

Taulukko 1. Rakentamistavan vaikutus rakennuksen ilmatiivyyteen /7, s. 21./

Tyypillisiä ilmavuotolukuja ( $n_{50}$ ) erilaisille rakennuksille riippuen rakentamis- ja toteutustavat huomioiden.		
Tavoiteilmatiivisyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset $n_{50}$ luvut, [1/h]
Hyvä ilmatiivisyys	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa (erillistarkastus)	Pientalo <b>1 ... 3</b> Asuinkerrostalo ja toimistorakennus <b>0,5 ... 1,5</b>
Keskimääräinen ilmatiivisyys	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo <b>3 ... 5</b> Asuinkerrostalo ja toimistorakennus <b>1,5 ... 3,0</b>
Heikko ilmatiivisyys	Ilmatiivyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo <b>5 ... 10</b> Asuinkerrostalo ja toimistorakennus <b>3 ... 7</b>

Energiatehokkaan talon rakentamisessa korostuu erityisesti hyvän eristävyys lisäksi rakennuskuoren ilmatiivisyys. Talon/rakennuksen ilmavuotolähteet voidaan jakaa hallittuihin ja hallitsemattomiin ilmavirtauksiin ja vuotoihin. Hallittuja ilmavirtauksia muodostuu tietoisesti rakennetuista ilman kulkeutumisreiteistä, joita ovat mm. ilmanvaihtoventtiilit, lämmitys-, ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät, tulisijat ja erilaiset hormistot. Nämä kaikki tietoisesti rakennetut ilman kulkeutumisreitit on otettu huomioon laskettaessa rakennuksen energiatasetta ja lämpöhäviöitä. Kaikki muut ilman kulkeutumisreitit, kuin edellä mainitut, ovat hallitsemattomia. Näitä virtauksia syntyy mm. raoissa, lohkeamissa, saumoissa ja huokoisissa pinnoissa. Lisäksi näitä hallitsemattomia ilmavuotoja aiheutuu rakennusvaiheen aikana tehdyistä puutteellisista tai virheellisistä työsuorituksista: asennetuista ilman/höyrynsuluista, rakennusosien välisistä saumoista, läpivienneistä sekä lämmöneristyskerroksen/eristeiden puutteellisuudesta.

Rakennusten ilmatiivyyttä on mitattu jo muutaman kymmenen vuoden ajan 1970–1980-lukujen vaihteesta lähtien. Rakennuksen ilmatiivisyys voidaan mitata käyttämällä siihen erityisesti kehitettyä laitteistoa (esim. Blower-door). Tiiviysmittauksessa rakennuksen tai sen osan ja ulkoilman välille asetetaan 50 Pa:n yli- ja alipaine. Kun paine-ero on saatu pysyväksi, mitataan sen ylläpitämiseksi tarvittava ilman tilavuusvirta. Rakennuksen ilmavuotoluku ( $n_{50}$ -luku) on suhteellisen yksinkertaisesti mitattavissa oleva suure, jonka avulla rakennuksista keskenään voidaan tehdä vertailukelpoisia. Kuitenkin normaalisti rakennuksissa esiintyvien paine-

erojen alueella (0–10...15 Pa) ilmavuotokäyrät saattavat poiketa toisistaan, vaikka ilmavuotoluku olisi sama. /8, s. 2./

### 3.2 Rakennuksen painesuhteet

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän on oltava sellainen, että ulkoilmaan nähden rakennus voidaan pitää pääasiassa alipaineisena. Alipaineen rakennuksessa tulisi kuitenkin olla alle 20 Pa, jottei ikkunoiden ja ovien avaaminen ei kohtuuttomasti häiriintyisi eikä myöskään ääntä aiheuttavia ilmavirtauksia syntyisi. Rakennuksen alapohjan yli olevan alipaineen tulisi olla pieni, koska haitallisten epäpuhtauksien ja radonin kulkeutuminen sisäilmaan halutaan estää. /9, s. 165./ Alapohjan ilmatiiviyn merkitys rakennuksen sisäilman laadun kannalta on merkittävä, koska radon on erittäin haitallinen terveydelle. Tämä tulee kyseeseen alueilla, joilla on odotettavissa radonia.

Rakennuksen ulko- ja sisätilan välinen paine-ero aiheutuu yleisesti mm. koneellisesta ilmanvaihdesta, tuulesta, tulisijojen käytämisestä ja lämpötilaeroista. Myös rakennusmateriaalien, rakennusosien (kuten ovet ja ikkunat) ja teollisesti valmistettujen elementtien ilmatiiveyttä tutkitaan laboratorio-olosuhteissa. Tällä hetkellä myös teollisesti valmistetuille asuinrakennuksille (pien- ja kerrostaloille) on laadittu ilmatiiveyden laadunvarmistuksen periaatteet ja ohjeet, joissa ilmoitusmenettelyllä voidaan määrittää talotyyppikohtainen arvo ilmavuotoluville. /6, s. 7./ Rakennuksen ilmapitävyyden mittaaminen painekoemenetelmällä on kuvattu pien- ja kerrostaloille standardissa SFS-EN 13829, joka tarkastellaan tässä työssä.

Ilmatiiviiltä ja painesuhteiden kannalta hyvin toimivalle rakennukselle voidaan antaa seuraavanlaisia ominaisuuksia /9, s. 165/:

- Ilmanvaihto toimii energiataloudellisesti (lämmöntalteenotto).
- Ilmanvaihto on helposti säädettävissä (ilmavirtojen ja -määrien tasapainotus).
- Tuloilma-aukkoja on riittävästi suhteessa poistoilmaan (koneellinen poistoilmavaihto).
- Paine-ero ulko- ja sisätilan välillä ei ole liian suuri (minimoidaan vuotoilmamäärät).
- Rakennusvaippa on mahdollisimman ilmatiivis.
- Lämpötilaolosuhteet pystytään ylläpitämään kohtuullisin kustannuksin.

Tampereen teknillisen korkeakoulun talonrakennustekniikan laboratorion tekemissä mittauksissa määritettiin puurunkoisten asuntojen painesuhteita kertamittauksilla kesäaikana. Mittauksista tuloksina saatiin rakennuksen painesuhteet rakennuksen ilmanvaihtolaitteiston käyttö-

minimi- ja maksiminopeudella. Mitatuista kohteissa poikkeuksellisesti kolmessa paine-ero oli ylipaineinen. Kaikkien kohteiden keskiarvo käyttötilanteessa oli -2 Pa. Koekohteiden mittaus-tuloksia esiintyi 2:n ja -12 Pa:n välillä. Tuloksien perusteella voitiin määrittää yleiset syyt suuriin paine-eron vaihteluihin. Yleensä syyksi todettiin riittämätön korvausilma-aukkojen määrä kohteissa, joissa oli koneellinen poistoilmanvaihto. Koneellisen tulo- ja poistoilman-vaihdon kohteissa syynä olivat likaantuneet suodattimet sekä ylimitoitettu ilmanvaihtojärjes-telmä. Edellä mainitut tekijät korostuivat yhä enemmän, mitä tiiveimpiä talojen rakennuskuo-ret olivat. /10, s. 56./

Puurunkoisten asuntojen painesuhteiden mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, että ra-kennuksen paine-eroon vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihtojärjestelmän toimivuus (oikein tasapainotettu) ja rakenteiden ilmatiiveys. Ilmavuotojen kannalta tarkasteltuna kaikkein eniten vuotoilmamääriin vaikuttavat rakennuskuoren tiiviyyden lisäksi vallitsevat painesuhteet sekä ulkoisten olosuhteiden muutokset esim. tuulen nopeus. Tuulen nopeuden kasvaessa ulkotilan ylipaineisuus kasvaa ja vastaavasti rakennuksen sisätilan alipaineisuus kasvaa, jolloin hetkel-lisesti vedon tunne korostuu. Rakennuksen ilmatiiviyttä parannettaessa tulee ottaa huomioon myös ilmanvaihdon toiminnan edellytykset. Kun rakennuksen ilmatiivyyttä parannetaan huo-mattavasti, mutta vastaavasti ilmanvaihdon toimintaan ei tehdä muutoksia, aiheuttaa se vuo-toilmamäärien merkittävää kasvua. Tämä johtuu paine-eron kasvusta ulko- ja sisätilan välillä. Rakennuksessa, jossa on koneellinen poistoilmanvaihto ja painovoimainen tuloilmanvaihto kyseinen ilmiö on hyvin mahdollinen, jos ilmanvaihto ei ole tasapainossa. /10, s. 56./

#### 4. ILMATIIVEYS NYKYISISSÄ JA UUSISSA PIEN- JA KERROSTA- LOISSA

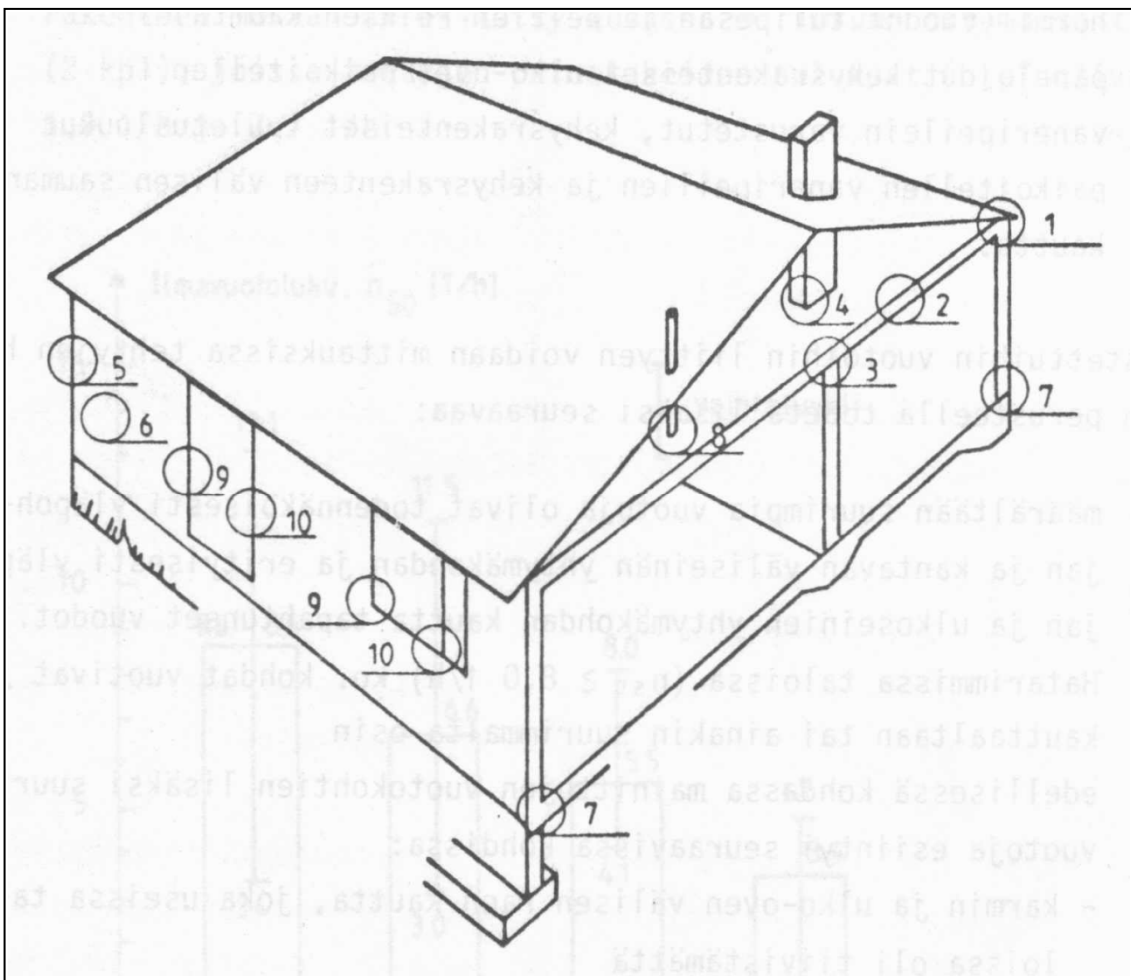
Suomessa rakennuksien ilmatiiviyttä on tutkittu muutaman vuosikymmenen ajan. 2000-luvulla laajempia tutkimuksia aiheesta ovat tehneet Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos ja Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorio /6; 11/. Ilmatiivysmittaukset keskittyivät 100 puurunkoiseen pientaloon, 20 hirsitaloon, 50 kivitaloon ja 56 kerrostaloasuntoon. Kivitalot jakaantuivat seuraavanlaisiin alaryhmiin: 10 kevytbetonitaloa, 10 kevytsoraharkkotaloa, 10 tiilitaloa, 10 betoniharkkotaloa ja 10 betonielementtitaloa. Kerrostalot oli jaettu puu- ja betonielementtikerrostaloihin. Puurunkoiset pientalot oli mitattu vuosina 2002–2004 ja hirsi-, kivi-, kerrostalot v. 2005–2007. Uudehkojen puurunkoisten pientalojen  $n_{50}$ -luvun keskiarvo oli 3,9 1/h, hirsitalojen 6,0 1/h, kivitalojen 2,3 1/h. Puurunkoisten kerrostalojen keskiarvo oli 2,9 1/h, betonielementtisten 1,6 1/h ja sellaisten kerrostalojen, joissa on paikalla valettu välipohja 0,7 1/h. Yleisesti katsoen puurunkoiset elementtitalot ovat keskimäärin paikalla rakennettuja taloja tiiviimpiä. Uudemmat talot olivat vanhempia tiiviimpiä, vaikka ero ei ole niin merkittävää. Koekohteissa, joissa eristemateriaalina ja ilmansulkuna oli käytetty seinissä ja yläpohjassa samoja materiaaleja, osoittautuivat polyuretaanieristeiset muita tiiviimmiksi. Puukuitueristeiset ja paperi-ilmansululliset talot olivat tiiviydeltään heikompia verrattaessa mineraalivillaeristeisiin ja muovihöyrysulullisiin. Hirsitaloissa, joissa oli käytetty perinteisiä saumaeristeitä (mineraalivilla, pellava ja polypropeeni), olivat heikommin ilmatiiviitä kuin kohteet, joissa oli käytetty tiiviimpiä saumaeristeitä (solukumi, paisuva eristenauha). /11 s. 21–30./

Ilmatiiveyden osalta voidaan havaita, että pientaloryhmien sisällä ja ryhmien välillä on hajontaa. Käytännössä kaikilla yleisesti rakentamisessa käytettävissä rakennevaihtoehdoista pystytään toteuttamaan ilmatiiveydeltään korkeatasoisia rakennuksia. Haluttaessa tehdä ilmatiivis rakennus, tulee ottaa huomioon rakenneksityiskohtien ja taloteknisten järjestelmien suunnittelun yhteensovittaminen, kuitenkin unohtamatta työsuorituksien asianmukaista toteuttamista.

Hallitsemattomia ilmavuotokohtia voidaan tutkia ja tarkastella talviolosuhteissa lämpökamerakuvauksen avulla, jolla löydetään rakennuksen paikalliset ilmavuotokohdat ja kylmäsiltojen paikat. Tehdyissä tutkimuksissa paikallistettiin tyypilliset ilmavuotokohdat. Kaikista pientaloissa havaituista vuotokohdista 37 % oli ulkoseinän ja yläpohjan liitoskohdassa. Merkittäviä ilmavuotokohtia aiheuttivat myös ikkunat ja ovet 31 % sekä ulkoseinän ja välipohjan liittymät

12 %. Ilmansulun läpivienneistä ja sähköasennuksista ilmavuotopaikkoja oli 8 %. Lisäksi vuotokohtia löytyi ulkoseinän ja välipohjan liitoksista ja ulkonurkista. Kerrostaloissa suurimmat vuotokohdat löytyivät ikkunoiden ja ovien liitoskohdista 72 %. Toiseksi suurimmat vuotokohdat kerrostaloissa löytyivät ulkoseinän ja välipohjan liitoksista 11 % ja ulkoseinän ja yläpohjan liitoksista 8 %. Yleisesti tyypillisimmät ilmavuotopaikat pien- ja kerrostaloissa ovat ulkoseinän liitoksissa ylä- ja välipohjan kanssa sekä ovien ja ikkunoiden liitoksissa, mukaan luettuna niiden rakenne itsessään. /6, s. 9./

Uusimpia asuintalojen ilmatiiviystutkimuksia VTT on tehnyt vuoden 2008 aikana. /8/. Tutkimukset ovat kohdistuneet eri yritysten uudisrakennuksiin. Asuinkerrostaloissa ilmavuotoluvut ovat vaihdelleet huoneistokohtaisesti 0,3–1,0 1/h. Ilmavuotokohdiksi tutkimuksissa ilmenivät ikkunatiivisteet, parvekeovet sekä porraskäytävän ulko-ovet. Vanhemmissa kerrostaloissa ilmavuotoluvut olivat jopa 2,0–3,0 1/h. Uusien kerrostalojen porrashuoneiden tulokset ovat olleet suurempia kuin 1,0 1/h, joka on ollut tyypillisesti 2–3-kertaiset kuin yksittäisten huoneistojen ilmavuotoluvut. Rakentajat, jotka ovat käyttäneet erityistä huomiota rakenteellisen ilmatiiviyyden toteuttamiseen, ovat savuttaneet rakennuksissa erittäin korkean ilmatiiviystason < 1,0 1/h. /8, s. 4./ Kuvassa 2 esitetään yleisimmin esiintyvät ilmavuotokohdat puuelementtitalossa, jotka sijoittuvat yleisesti rakenteiden epäjatkuvuuskohtiin (esim. erilaisiin saumoihin ja liitoksiin).



Kuva 2. Yleisimmät ilmavuotokohdat paikalla tehdyissä elementtirakenteisissa puutaloissa /11, s. 41./  
Lupa käyttöön myönnetty.

- 1 ulkoseinät – yläpohja
- 2 yläpohja paikoitellen (höyrynsulun jatkokset ja reiät, sähköputkien läpiviennit)
- 3 yläpohja – kantava väliseinä
- 4 yläpohja – hormi
- 5 nurkat
- 6 ulkoseinät paikoitellen (sähköputkien läpiviennit, elementtien väliset saumat)
- 7 ulkoseinät – alapohja
- 8 ilmanvaihtokanavien läpiviennit
- 9 ulkoseinät – karmit
- 10 karmit – ikkunoiden puitteet, tuuletusluukut tai ovet

## 5. ILMATIIVIIDEN RAKENNERATKAISUT

### 5.1 Rakenteellisen ilmatiiveyden toteuttaminen

Rakennuksen hyvän ilmatiiveyden saavuttaminen edellyttää rakennusvaipan kaikkien osien ja niiden välisten liitosten rakenteellisten ohjeiden soveltaminen niin, että niiden toteuttaminen on rakennuskelpoista. Valvonnan vaikutus rakentamisvaiheessa on hyvin suuressa merkityksessä. Tällöin työmaalla valvonnasta vastaava tiedostaa rakenneratkaisujen ongelmakohteet ilmatiiviyden osalta ja pystyy opastamaan työntekijöitä tavoitteellisen ilmapitävyyden saavuttamiseksi. Ilmatiiviin kerroksen tulee jatkua yhtenäisenä koko rakennuksen vaipan ympäri /6, s. 10./ Rakennusosien tulee liittyä tiiviisti toisiinsa, joten ilmasulun saumojen ja liitosten tulee olla huolellisesti tiivistetty.

Yleisesti rakenteen ilmatiiveys toteutetaan erillisellä ilmansulkukerroksella. Jos rakenne itsessään on riittävän ilmatiivis, ei välttämättä tätä tarvita. Kerroksellisissa rakenteissa (esim. puurakenteiset asuinrakennukset) tarvitaan aina höyrynsulkukerros, joka toimii myös hyvin yleisesti myös ilmansulkukerrosena. Muuratuissa harkkorakenteissa ilmansulkukerroksen muodostaa yleisesti tasotekerros ja puurakenteissa erillinen kalvomainen tai levymäinen ilman- ja höyrynsulkukerros. Massiivirakenteisessa vaipassa (esim. hirsi-, tiili- tai kevytbetonielementtirakenne) ei varsinaisesti ole erillistä lämmöneristekerrosta, vaan koko rakenne toimii ilmansulkuna. Tässä tapauksessa kaikki saumat ja liitoskohdat tulee tiivistää huolellisesti. /6, s. 10./

Puurakenteisissa asuintaloissa ilman- ja höyrynsulku toteutetaan yleensä yhdellä yhtenäisellä kerroksella. Tämä ainekerros sijoitetaan kerroksellisesti rakenteessa yleensä lämpimälle puolelle sisäpinnan lähelle. Ilmansulkuna voidaan käyttää esim. kalvoa, levyä, ilmatiivistä solumuovieristettä tai betonirakennetta, joiden saumat on tiivistetty huolellisesti. Ilmansulun ilmanläpäisykertoimen tulee olla riittävän pieni, jotta se estää haitalliset ilmavirtaukset ja sen sisältämän vesihöyryn rakennusosan tai -osien välillä. Lämmöneristeet tulee asentaa rakenteeseen siten, että ne täyttävät niille varatun tilan mahdollisimman hyvin. Eristeet tulee liittää tiiviisti ympäröiviin materiaalikerrokseen ja rakenteisiin. Avohuokoisia lämmöneristeitä käytettäessä eristeen ulkopintaan asennetaan lisäksi tuulensuoja, joka estää tuulen aiheuttamat haitalliset ilmavirtaukset lämmöneristekerroksessa. Kaikissa rakennuskohteissa tarvitaan huolellista yksityiskohtien suunnittelua, koska etenkin sekarakenteiden yhteensovittaminen asettaa erityisesti haasteita ilmapitävyyden osalta. Tämä johtuu siitä, että näitä sekarakenneratkaisujen suunnittelua ja toteutusta ei ole ohjeistettu riittävästi. Suunniteltaessa rakennuksen ilma-

tiivyyttä tulee yksityiskohtaisen suunnittelun ohella kiinnittää myös suurta huomiota ilmatiiviiden kokonaisvaltaiseen huomioimiseen. Edellä mainitut asiat eivät kuitenkaan yksinään johda ilmatiiviin rakennuksen aikaansaamiseksi. Työnjohdolla ja työntekijöillä tulee olla tiedossa ne tavoitteet, miksi halutaan tehdä ilmatiivis rakennus ja motivaatiota sen tekemiseksi. /6, s. 10–11./ Tärkeintä työnjohdon kannalta on, että he tietävät työmenetelmät ja rakenneratkaisut, joilla tavoitteellinen ilmatiiviyys voidaan saavuttaa.

Rakennuksen ilmatiiveyden toteuttamiseen käytettyjen materiaalien ja tarvikkeiden tulee säilyä ilmatiiviinä koko suunnitellun käyttöiän ajan. Rakennuksen rakenteiden ja niiden saumojen ja liitoksien tulee kestää pieniä muodonmuutoksia niin, ettei haitallisia halkeamia tai muita haitallisia muutoksia rakenteen toimivuuden kannalta pääse syntymään. Ilmansulkuun rakennusvaiheessa syntyvät reiät ja muut epätiiviit kohdat tulee paikata ilmansulkukerroksen tyyppin mukaisella tavalla. Yleisesti ilmansulun reiät paikataan joko vaahdottamalla, kittaamalla tai riittävän tartuntakyvyn ja pitkäaikaiskestävyyden omaavalla teipillä. Ilman- ja/tai höyrynsulkuna käytettyjen materiaalien on oltava kestäviä. Rakennuksen rakennusosien välisissä liitoksissa ja rakenteisiin piiloon jäävissä tai muuten ilmansulun hankalasta sijainnista johtuen tulee materiaalin pitkäaikaiskestävyys varmistaa. Tämä johtuu siitä, että jos rakenteita joudutaan avaamaan ja uusimaan, on ilmatiiviiden rakenteiden parantaminen ja korjaaminen huomattavasti vaikeampaa. /6, s. 11./

## **5.2 Rakenneosien ilmatiivisyys**

### *5.2.1 Puurakenteiset asuinrakennukset*

Suomessa yleisin asuinrakennuksen runko on puusta. Puurunkoisille rankaseinille tarkoitettu- ja ilmatiivyyden toteuttamisohjeita voidaan soveltaa myös asuinrakennuksille, joissa on metallirankaseinät. Puurunkoisissa seinissä ilmansulkukerros sijaitsee mahdollisimman lähellä rakenteen sisäpintaa, jonka tehtävänä on estää haitallisten ilmavirtauksen muodostumista lämmöneristyskerroksen lävitse. Puurunkoseinissä tarvitaan lisäksi riittävän vesihöyryvastuksen omaava höyrynsulku, joka estää haitallisen kosteuden siirtymistä rakenteeseen. Hyvin yleisenä käytäntönä on, että samaa ainekerrosta käytetään ilman- ja höyrynsulkukerroksena. Puurunkoseinässä ilman- ja höyrynsulku toteutetaan käyttämällä muovista valmistettuja kalvo- maisia tuotteita. Muovikalvoja korvaavina tuotteina voidaan käyttää myös paperipohjaisia ilmansulkukalvoja. /6, s. 12./ Ilmansulkupaperia käytettäessä on kuitenkin huomioitava, että lämmöneristyskerroksen materiaali on puukuitueriste esim. eko-villa tai selluvilla. Ilmansulkupaperi estää ilmavirtauksien muodostumista lämmöneristyskerrokseen, mutta ei vesihöyryn

kulkeutumista. Puukuitueristeet pystyvät sitomaan ja luovuttamaan sisäilman kosteutta, jolloin ehkäistään kosteuden tiivistymisriski rakenteen sisään. /3, s. 18./

Ilmansulkukalvo sijoitetaan yleisesti joko sisäpinnan levyn taakse tai n. 50 mm:n etäisyydelle lämmöneristeen sisäpuolelle. Hyvän ilmanpitävyyden saavuttamiseksi suositeltavaa asentaa ilmansulkukerros lämmöneristeen sisään, jolloin saadaan minimoitua siihen syntyvien reikien määrä. Upotetut sähköasiat ja levyn takana kulkevat sähköputkitukset ovat suojassa, jolloin vältetään ilmansulun rikkomiselta. Jos Ilmansulkukerros sijoitetaan sisäpinnan levyn taakse kalvomaisella materiaalilla, on syytä ottaa huomioon sähköasennuksien aiheuttamat epätiiviskohdat ilmansulkuun. Sähkörasioiden tiivistäminen ilmansulkuun tai sisälevyyn ei varmista luotettavaa ilmanpitävyyttä, koska rasioiden rakenteet itsessään eivät ole ilmatiiviitä. /6, s. 12./ Ilmansulku voidaan asentaa myös sisäverhouksen taakse riittävän löysästi, jolloin sähköasennukset voidaan tehdä ilmansulun ja sisäverhouksen väliin ilmansulkua mahdollisimman vähän rikkomatta.

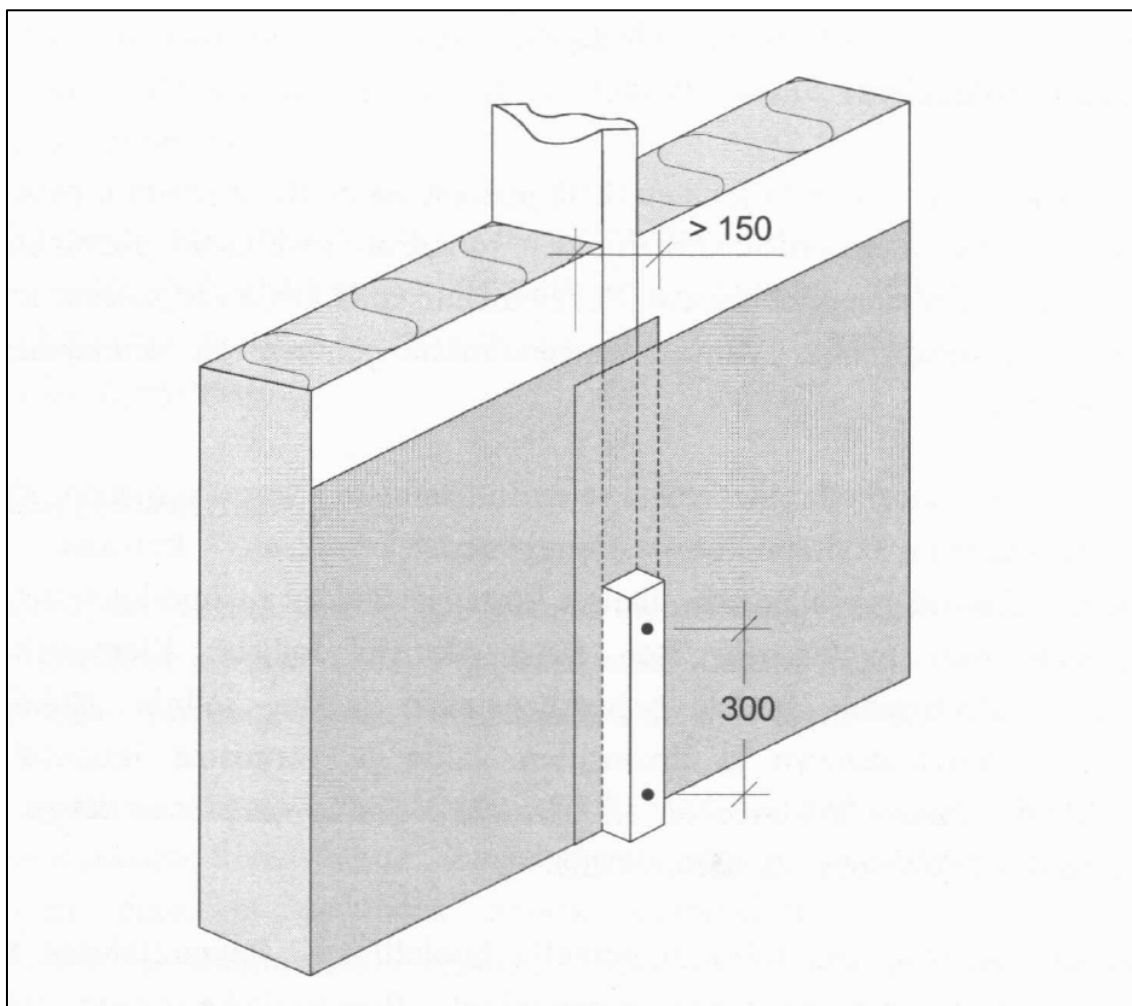
Vaihtoehtoisesti ilmansulkukerros voidaan toteuttaa levymäisellä ilmansulkumateriaalilla. Materiaaliksi soveltuu hyvin esim. solumuovieristelevy, joka on riittävän tiivistä käytettäessä yhtenäisenä pintana. Levytyksessä syntyvät saumat tulee vaahdottaa polyuretaanivaahdolla tai teipata riittävän hyvällä ja pitkäaikaisella tartuntakyvyn omaavalla teipillä. Vaahdotettujen saumojen teippaamisella varmistetaan saumakohdan pitkäaikainen kestävyys, mikäli rakenteeseen kohdistuu kosteusrasitusta ja muodonmuutoksia, joka voi aiheuttaa vaahdotukseen halkeamia. /6, s. 13./

Ilmansulkukalvot ja myös levytuotteet aiheuttavat jatkoskohdissa seinärakenteessa aina hyvin todennäköisen epäjatkuvuuskohdan rakennusvaipan yhtenäisen ilmansulkukerroksen muodostumiseen. Jatkokset voidaan suorassa seinärakenteessa toteuttaa limittämällä ilmansulkukalvot ja puristamalla kahden puun (runkotolpan ja sisäpuolisen pystykoolauksen) väliin, kun ilmansulkukalvo sijoitetaan rakenteen sisälle. Riittävä ja pysyvä puristuskiinnitys saadaan aikaiseksi riittävän tiheällä ruuvikiinnityksellä (300 mm:n välein). Limityksen tiivistämiseen vaihtoehtoisesti voidaan käyttää saumakohdan teippaamista. Tärkeää on, että liitos on mahdollisimman yhtenäinen koko seinärakenteen korkeudelta, jotta saavutetaan saumakohdan riittävä ilmatiiveys. Jos teippimateriaaliin kiinnittyvyydestä ja kestävyydestä ei ole varmaa tietoa, on suositeltavaa tehdä lisäksi puristusliitos. Tällä varmistetaan, etteivät saumakohdat aukea teippausten pettäessä. Tiivistyskohtaa ei pidä tehdä nurkkaan, vaan aina selvästi toisen seinärakenteen puolelle. /6, s.14./ Jos ilmansulkukerros sijoitetaan sisäverhouksen taakse löysästi,

tulee jatkoskohdat sijoittaa aina runkotolpan kohdalla, jolloin saavutetaan mahdollisimman ilmatiivis liitos.

Ilmansulkukerroksen ohella myös lämmöneristekerroksen ulkopinnassa oleva tuulensuojakerroksen tärkeys koko rakenteen toimivuuden kannalta on merkittävä. Jos lämmöneristyskerrokseen pääsee ulkoa kylmää ilmaa runkotolppien ja lämmöneristeen väliin jääviin rakoihin, voi siitä aiheutua sisäistä konvektiota. Rakenteessa sisäinen konvektio alentaa merkittävästi lämmöneristeen eristyskykyä ja sen kautta koko rakennuksen ulkovaipan energiatehokasta toimivuutta. Tuulensuojakerroksen rakennusmateriaalina voidaan käyttää tuulensuojalevyä, -kangasta tai tuulensuojapintaista lämmöneristelevyä. /6, s. 15./

Puuelementtiseinien rakenteellista ilmatiiveyttä tarkasteltaessa joudutaan soveltamaan hyvin paljon samoja ohjeita kuin puurankarakenteille. Elementtiseinissä ilmansulkukalvoa ei suositella sijoitettavan lämmöneristyskerroksen sisään, ellei sen kuivana pysymistä voida luotettavasti varmistaa. Pääperiaattein ilmansulkukalvon sijoittaminen, asentaminen ja liitosten toteuttaminen tehdään samoja menetelmiä käyttäen kuin puurunkoisilla rankaseinillä. Poikkeuksena kuitenkin on, että sijoitettaessa ilmansulkukerros sisäpinnan levyn taakse, suositellaan sähköasennukset tehtäviksi pinta-asennuksina. Elementtien liitoksien suunnittelussa ja toteutamisessa tulee huomioida rakennuksen ilmatiiveydelle asetetut tavoitteet. Elementtien välisten liitoksien ja saumojen tiivistämisessä käytetään ilmansulkumateriaalin ominaisuuksista riippuen kalvojen limittämistä, puristamista, teippaamista tai saumojen vaahdottamista niin että tiivistystyömenetelmä on soveltamis- ja rakennuskelpoinen kyseessä oleville rakenteille. Elementtien väliset runkopuut tulee kiinnittää yhteen nurkista käyttäen esim. kulmateräksiä, jolloin voidaan varmistua, etteivät kosteusliikkeet ja muodonmuutokset aiheuta vaurioita ilmanpitävälle kerrokselle. Liitokset ympäröiviin rakenteisiin tulee suunnitella niin että elementtien välisen liitosten tiivistyksen tekeminen on mahdollista ja etteivät ympäröivien rakenteiden liikkeet vauriota niiden välistä tiiveyttä. /6, s. 16./ Kuvassa 3 esitetään periaate, kuinka puurakenteisessa seinässä ilmansulkukerroksen jatkokset limitetään ja tiivistetään.



Kuva 3. Periaatepiirros, kuinka puurakenteisessa seinässä ilmansulkukerroksen liitos limitetään ja puristetaan runkotolppaa vasten puurimalla /6, s. 15./

### 5.2.2 Massiivirunkoiset asuinrakennukset

Massiivirunkoisten asuinrakennuksien rakennusvaiheessa ei välttämättä ole erillistä lämmöneristyskerrosta (esim. hirsi-, tiili- tai kevytbetonielementtirakenteet). Tässä tapauksessa rakennuksen koko rakenne toimii ilmansulkukerrosena. Massiivirunkoisia rakennuksia ovat mm. erilaiset hirsi-, tiili-, harkko-, ja betonielementtirakenteet. Itsessään massiivirakenteet tasaisina pintoina ovat hyvin ilmanpitäviä, etenkin betonielementtirakenteet. Hirsirakenteet aiheuttavat suurien saumamäärien takia paljon potentiaalisia ilmavuotoreittejä, joka asettaa erityisiä vaatimuksia tiivistystyön toteuttamisen huolellisuudelle. Oleellista kuitenkin on, että kaikissa rakennetyypeissä sauma- ja liitoskohdat tiivistetään asianmukaisin työmenetelmin.

Harkko- ja tiiliseinärakenteissa ilmanpitävän kerroksen rakenteen pintaan muodostaa erilaisen pintakäsittelymenetelmien tuloksena saadut tiiviit rappaus- ja tasoitekerrokset. Harkko- ja tiilimateriaalit eivät rakennusmateriaaleina ole riittävän ilmanpitäviä, vaan huokoisia ”hengittäviä” materiaaleja. Rakenteissa mahdollisesti esiintyvät raot, saumat ja halkeamat aiheuttavat

lisäksi ilmavuotoja rakenteeseen. Muurattujen tiiliseinien riittävä ilmanpitävyys voidaan tarvittaessa varmistaa, jos muuraustyön huolellisuudesta ei ole riittävää varmuutta /6, s. 16./ Haluttaessa tiilirakenteille hyvä ilmanpitävyys, tulee muuraustyö suorittaa huolellisesti, mikäli tiiliseinää ei pinnoiteta.

Pinnoitekerros tulee levittää kokonaisuudessaan ulkoseinien sisäpinnoille ja sen tulee liittyä rakenneteknisesti soveltuen ympäröiviin rakennusosiin, oviin, ikkunoihin ja ilmanpitäviin kerroksiin. Lisäksi pinnoitteen tulee ulottua seinärakenteen ylä- ja alareunan koko välisen matkan sekä kiintokalusteiden ja yläpohjarakenteiden ulkopuolelle /6, s. 17./

Betonielementeistä muodostuvat betoniset vaipparakenteet ovat rakenneosina hyvän ilmatii- viyden omaavia, joihin suurten halkeamien syntyminen estetään riittävän tiheällä raudoituk- sella. Syntyneet halkeamat rakennuksen käytön aikana voidaan elementtirakenteisiin ilmatii- viyden korjaamiseksi ja parantamiseksi tiivistää pintakäsittelyllä. Elementtien liitokohdat ti- vistetään juotosvaluilla tai joustavien elastisten saumojen avulla. /6, s. 17./

Yläpohjan betonielementtien pitkittäissaumat voidaan toteuttaa ilmanpitävyyden laadunvar- mistusohjeen /2, s. 8/ mukaisilla tavoilla:

- Tiivistää saumojen päälle asennettavilla ilmansulkukaistoilla (esim. bitumikermikais- toilla)
- Tiivistää kokonaisuudessa yläpohjan päälle asennettavalla ilmansulkukerroksella (esim. muovikalvolla)
- Tiivistää laattojen päälle valettavalla erillisellä tasausvalulla tai muulla soveltuvalla menetelmällä, jolla voidaan taata riittävä ilmantiiveys

Hirsirakenteet ja niiden painumat aiheuttavat erityistä huomiota tehtäessä suunnitteluratkaisu- ja. Hirsirakenteet painuvat rakentamisvaiheen jälkeen, joka on otettava huomioon tekemällä painumavarat ovi- ja ikkuna-aukkojen ja muiden painumattomien rakenneosien kohdalle. Ra- kenneosien väliset saumat on syytä suunnitella niin että tehdyt ilmatiiveysratkaisut eivät vau- rioidu painumien vaikutuksesta. Kuitenkin hirsirakenteiden painumat tulisi olla tasaisia koko rakennuskuoren alueella, jolloin ehkäistään tehokkaasti haitallisten painuma-erojen muodos- tumista.

Hirsiprofiilin muodolla on eniten vaikutusta rakenteen ilmanpitävyyteen, kuten myös hirren paksuudella. Hirsien kuivuessa muodostuu erikokoisia rakoja ja lohkeamia, jotka heikentävät

myös sen ilmantiiveyttä. Kuitenkin vastaavasti ajan myötä painuminen parantaa hirsirakenteen ilmantiiveyttä. Painumisen jälkeen on syytä tarkistaa liitos- ja saumakodat, jotka voidaan tarvittaessa tiivistää uudelleen. Tiivistäminen voidaan suorittaa elastisilla tiivistenauhoilla, vaahdottamalla tai kittaamalla, riippuen rakenteen ominaisuuksista.

Hirsien välisten saumojen tiivistämiseen käytetään saumaeristeitä. Eristemateriaalina voidaan käyttää tiiviitä elastisia, joustavia ja paisuvia solumuovi- tai kumitiivisteitä /6, s. 17./ Muillakin tiivistämismenetelmillä ja materiaaleilla voidaan saavuttaa riittävä ilmanpitävyys esim. pellava tai mineraalivillaeristeillä. Kuvassa 4 on yksi saumaeristeenä käytettävä tuote, paisuva eristenauha. Kaikkein potentiaalisimmat ilmapuotojen kohtia ovat seinien nurkkaliitokset (nurkkasalvokset). Kuvassa 5 esitetään hirsirakenteen nurkkaliitoksen ilmatiiviuden toteuttaminen pellavanauhaa käyttäen. Nämä liitokset voidaan tiivistää käyttäen samoja tiivistemateriaaleja, kuitenkin soveltaen liitoksen leveyden salliessa leveämpiä eristekaistoja käyttäen. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys /10/ tutkimuksessa havaittiin, että hirsitaloissa, joissa oli käytetty solukumia ja paisuvaa eritenauhaa, olivat tiiviimpiä perinteisten saumaeristeiden (mineraalivilla, pellava ja polypropeeni) taloihin verrattuna.



Kuva 4. Paisuva hirsieristenauha (sivuilta impegroitu pehmeä polyuretaanivahto) /13, s. 1./



Kuva 5. Hirsirakenteen nurkkaliitoksen eristäminen pellavanauhaa käyttäen /14./

### 5.3 Ilmansulkukerroksen läpiviennit

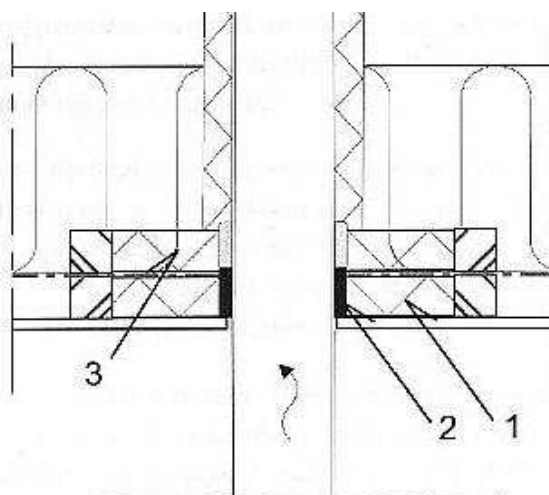
#### 5.3.1 LVIS-läpiviennit

Rakennuksen ulkovaipan läpi menevät LVIS-asennukset ”puhkaisevat” ilmansulkukerrokseen ja näin ollen aiheuttavat rakenteisiin epätiiveyttä. Tiivistystyön huolellinen tekeminen on tärkeää, riippumatta siitä että millä tiivistysmenetelmällä työ suoritetaan. Huonosti tiivistetyt läpivientien saumakohdat aiheuttavat paikallisia ilmavuotoja, jotka voivat tuoda haitallisia määriä kosteutta rakenteisiin, mikrobeja ja homeitiöitä rakennuksen sisäilmaan. Seinärakenteiden alaosissa sijaitsevat läpiviennit esim. pistorasiat voivat paikallisesti aiheuttaa ilmavuotoja ja niiden vaikutuksesta vedontunnetta (suhteessa suuri ilman virtausnopeus).

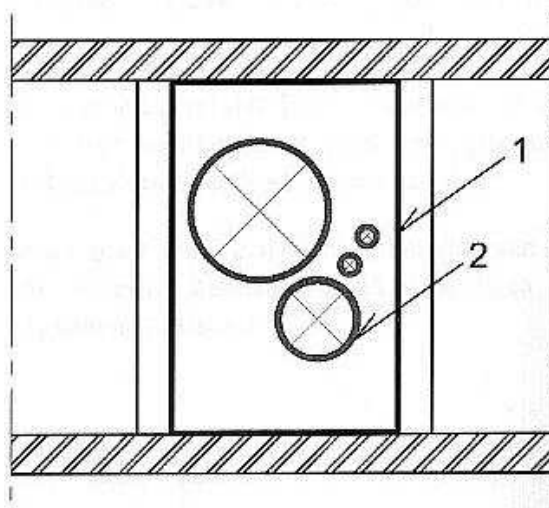
Yksittäisissä putkiläpivienneissä voidaan käyttää läpivientilaippoja. Putkiläpiviennit voidaan tiivistää myös vaihtoehtoisesti vaahdottamalla tai elastisella saumausmassalla (kitillä), jos ympäröivä ilmansulkukerros on riittävän jäykkä esim. levymäinen kerros. Jos läpivientien tiivistämiseen käytetään teippausta, tulee teipin tartuntakyvyn ja kestävyys olla riittävä, jotta rakennuksen käyttöänsä ajan välttyttäisiin haitallisten vaurioiden muodostumiselta. /6, s. 84./ Hirsirakennuksien läpivientien suunnittelussa ja toteutuksessa on otettava huomioon rakenteen painumat. Etenkin kalvomaisia ilmansulkukerroksia käytettäessä on huomioitava, että painumat eivät voi aiheuttaa sauman vahingoittumista tai ilmansulun repeämistä jostain muusta kohdasta. Polyuretaaniset saumausvaahdot ovat osoittautuneet erittäin käyttökelpoisiksi, tiivistetyt saumat on todettu ilmaa läpäisemättömiksi /12, s. 64./ Näin ollen niitä voidaan käyttää hyvin monenlaisiin tiivistysrakenteisiin, puu-, kivi- ja betonirakenteisiin.

Puurankarakenteissa käytetään yleisesti ilmansulkukerroksena muovikalvoja. Useiden toisiaan lähekkäin sijaitsevien läpivientien (putkiryhmien) tiivistämiseen voidaan käyttää solumuovieristelevystä valmistettuja kaulusrakenteita, jolla voidaan taata mahdollisimman ilmatiivis rakentamiskelpoinen rakenneratkaisu (Kuva 6 a ja b). Solumuovieristelevy vaahdotetaan puurakenteen (koolausrimojen) väliin vaahdottamalla, johon läpivientiputket voidaan sen jälkeen tiivistää vaahdottamalla. Ilmansulkukalvon tiivistys voidaan toteuttaa kaulusrakenteeseen esim. teippaamalla tai vaahdottamalla. /6, s. 84./

a)



b)



Kuva 6. Putkiläpivientien tiivistäminen solumuovieristelevykauluksella kuvattuna a) sivulta ja b) ylhäältä /6, s. 86./

- 1 Solumuovieristelevy vaahdotetaan kattokannattajien ja rimojen väliin. Tällöin levyjen taakse jää ehjä ilmansulkukerros
- 2 Läpivientiputket vaahdotetaan tiiviisti kiinni solumuovikaalukseen.
- 3 Vaihtoehtoisesti ilmansulun toiselle puolelle voidaan asentaa solumuovieristelevy. Tämän vaatii erillisten koolausrimojen asentamista rakenteeseen.

Läpivienninrakenne voidaan toteuttaa myös kahdesta eri materiaalista. Tällöin rakenne muodostuu metallisesta tai puisesta kehyksestä, läpiviennin pintaan ulottuvasta lämmöneristeestä ja ulko- ja sisäpuolelle asennettavista suojapelleistä. On myös mahdollista tehdä läpivienti ilman kehysrakennetta, mutta siinä tapauksessa tiiveyden kannalta ongelmallisia kohtia ovat suojapeltien ja seinärakenteen pinnan välisten liitoskohtien ilmatiiveys. Liitoskohdat voidaan tiivistää itseliimautuvaa solumuovinauhaa käyttäen. Samaa tiivistysmenetelmää voidaan käyttää suojapeltien ja puu- tai metallikehyksen sauman tiivistyksessä.

Massiivirunkoisissa kivi-, betoni-, ja hirsirakenteissa tai levymäisen ilmansulkukerroksen omaavissa rakenteissa läpiviennit voidaan tiivistää vaahdottamalla tai saumaussmassalla. Kivirakenteissa läpiviennin tiivistys voidaan myös tehdä putken ulkopuolelle valamalla esim. teräsbetonilaatoissa. Jos läpiviennin saumasta halutaan vielä tämän jälkeen tehdä hyvin tiivis, on syytä viimeistellä sauma saumaussmassalla tai vaahdottamalla.

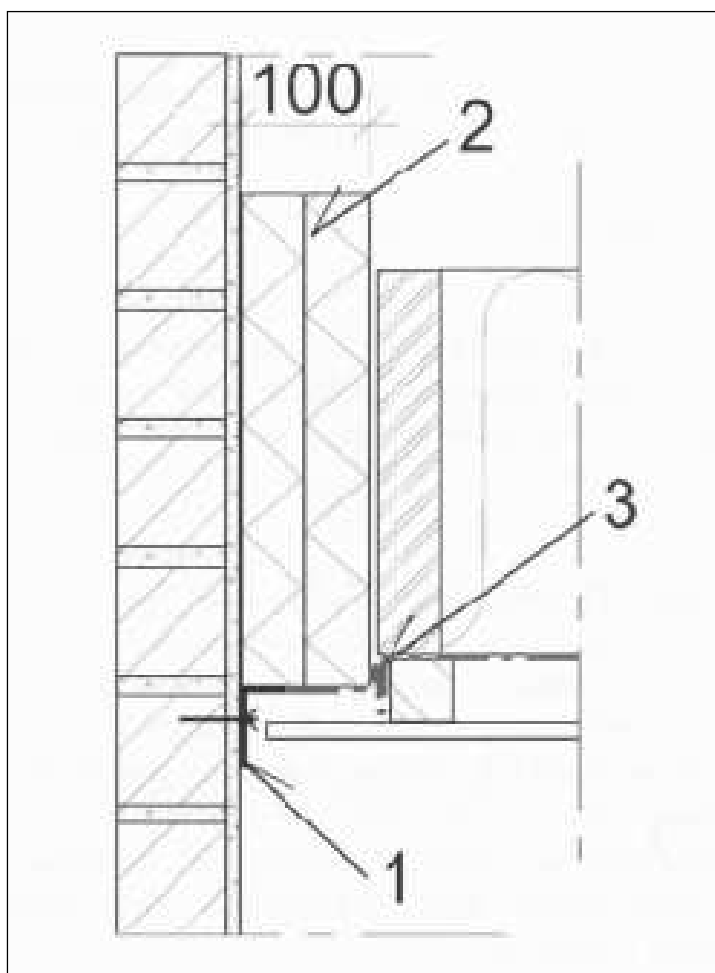
Olemassa olevien läpivientien ilmavuotokohtien tiivistäminen jälkeinpäin on käytännössä hankalaa. Rakenteiden purkaminen ainoastaan läpivientien ilmatiiviyden parantamiseksi, ei ole kustannustehokasta tai muilta osin kannattavaa. Rakennuksen peruskorjauksen yhteydessä on syytä tarkastaa läpivientien saumojen kunto ja tarvittaessa tehdä toimenpiteet ilmatiiviyden varmistamiseksi. Läpivientien ilmanpitävyyttä voidaan jossain määrin parantaa saumaamalla ja vaahdottamalla saumat uudelleen.

### 5.3.2 Hormiläpiviennit

Savuhormien läpivienneissä ylä- ja alapohjarakenteissa on suunnittelussa ja toteutuksessa otettava huomioon paloturvallisuuden ja -määräysten asettamat vaatimukset. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E3, Pienten savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus esitetään savupiippuja ja hormoneja koskevat määräykset ja ohjeet. /15./

Paikalla tehdyn savupiipun ja siihen liittyvän rakennusosan (ylä- ja välipohjat) väliin jätetään vähintään 20 mm:n liikuntaväli, joka täytetään siihen soveltuvalla A1-luokan rakennustarvikkeella. Muulla kuin A1-luokan tarvikkeista tehty rakennusosat (myös seinät) on sijoitettava 100 mm:n etäisyydelle savupiipun ulkopinnasta ja täytettävä soveltuvalla A1-luokan rakennustarvikkeella. /15, s. 5./

Hirsirunkoisten asuinrakennusten savupiippujen ja hormiläpivientien suunnittelussa on otettava huomioon rakenteiden painuminen. Kuvassa 7 on esitetty paikalla rakennetun tiilirakenteisen savuhormin ja puuyläpojan läpivienti, jossa on huomioitu painumavara.



Kuva 7. Paikalla muuratun tiilisavupiipun läpiviennin tiivistys, jossa hirsirungon painuma otetaan huomioon /6, s. 94./

- 1 Tiilihormin ympärille asennetaan peltikaulus, joka tukee yläpuolella olevaa eristystä.
- 2 Palomääräysten vaatima A1-luokan palonsuojaeristys (100 mm).
- 3 Yläpohjan ilmansulkukalvo jätetään savuhormin ympäriltä riittävän pitkäksi ja taitetaan pussille kattokannattajan ja palonsuojaeristeen väliin.

## **6. RAKENNUSTEN ILMAVUOTOLUVUN MITTAUS**

### **6.1 Ilmavuotoluvun mittausmenetelmät**

Painekoemenetelmää eli ns. painekoetta on käytetty 1970-luvusta lähtien Yhdysvalloissa, Kanadassa ja Ruotsissa /12, s. 15./ Nykyään Suomessa käytettäväksi kansalliseksi standardiksi on vahvistettu ja otettu käyttöön eurooppalainen standardi SFS-EN 13829:2000 ”Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified).” Rakennusten ja asuntojen ilmatiiveys mitataan yleisesti painekokeella. Asuintalojen rakennusvaipan ilmavuotoluvun mittaus 50 Pa paine-erolla esitetään standardin SFS-EN 13829 /16/ määritetyllä tavalla. Seuraavissa kappaleissa ja luvuissa esitetään mittausmenetelmien asettamia vaatimuksia ja reunaehdoja mittausten suorittamiselle.

Mittausmenetelmän tarkkuus määräytyy hyvin suurelta osin mittalaitteiden ja laitteistokoonpanon lisäksi vallitsevista olosuhteista, joissa mittauksia suoritetaan. Uusissa asuinrakennuksissa ilmatiiveyden mittaus on suositeltavaa tehdä rakentamisen siinä vaiheessa, kun kaikki ilmatiiviyteen vaikuttavat rakennustyöt on tehty valmiiksi. Rakennuksen ei välttämättä tule olla kokonaisuudessaan valmis, jolloin tarpeen vaatiessa voidaan tehdä toimenpiteitä ilmatiiveyden parantamiseksi. Alustavalla ilmatiiveyden mittauksella keskeneräiseen rakennukseen voidaan havaita ilmavuotoja, jotka voidaan korjata huomattavasti helpommin, kuin kokonaan valmiissa rakennuksessa. Asuinrakennuksen ilmavuotoluvun mittaaminen on suositeltavaa toteuttaa vasta, kun rakennuksen koko rakennusvaippa tai sen osa on kokonaisuudessaan valmis. Näin saadaan hyvin kattava kuvaus rakennusvaipan rakenteellisen ilmatiiviyden toimivuudesta.

Ilmavuotoluvun mittaus voidaan suorittaa standardin SFS-EN 13829 mukaisesti kahdella eri tavalla, perustuen mittaukselle asetettuihin tavoitteisiin. Yleisesti mittaus voidaan suorittaa rakennusvaipasta tai sen määritetystä osasta kuten yksittäisestä huoneistosta.

Standardissa kuvaillaan kahden tyypistä testausmenetelmää riippuen mittauksen tavoitteista:

**Menetelmä A (käytössä oleva rakennus):**

Rakennuskuoren tila edustaa sitä tilaa kautena, jolloin rakennuksen sisäilmastotavoitteiden saavuttamiseksi ilmastointi-, jäädytys- tai lämmitysjärjestelmää käytetään.

**Menetelmä B (rakennusvaipan testaus):**

Kaikki tietoiset aukot rakennuskuoressa tulee sulkea tai tiivistää esim. korvausilmaventtiilit ja tulo- ja poistoilmakanavat.

Seuraavassa esitetään menetelmä B:n (rakennuskuoren testaus) valmistelevat toimenpiteet. Ennen varsinaisen rakennuskuoren mittausta tulee kaikki ulkoiset aukot rakennuksesta sulkea, joita ovat yleensä ovet ja ikkunat. Tämän jälkeen kaikki säädettävät aukot ja jäljelle jäävät suunnitellut aukot tulisi tiivistää, joita ovat mm. ilmanvaihtoventtiilit, liesituulettimet, tulipesien luukut, savuhormien sulkupellit ja korvausilmaventtiilit. Ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät ja niiden toiminta on pääasiallisesti kytkettävä pois päältä. Lisäksi mekaaninen tuuletus ja ilmalämmitysjärjestelmä tulee kytkeä pois päältä. Ilmanvaihtojärjestelmän tulo- ja poistoventtiilit on tiivistettävä huolellisesti. On suositeltavaa tyhjentää tulipesät tuhkasta ennen mittauksia ja luukkujen tiivistämistä. Viemäröinnin lattiakaivojen vesilukoissa tulee olla riittävästi vettä tai vastaavasti tiivistetty huolellisesti. Tärkeintä rakennuksen valmistelussa mittaukseen on, että kaikki läpiviennit ja ilmanvaihtoventtiilit löydetään ja tiivistetään huolellisesti. Yksi tärkeimmistä toimenpiteistä ennen varsinaisen mittauksen aloittamista on tehdä tutkittavan rakennuskuoren tai sen osan paineistuksen muodostuvan mahdollisimman tasaiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että paine-ero muodostuu rakennuskuoreen kokonaisuudessaan yhdessä vyöhykkeessä. Tasaisen paine-eron ylläpitämiseksi ulko- ja sisätilan välillä tulee kaikki tutkittavalla alueella olevat väliovet pitää auki, kuitenkin kaapistojen ja komeroiden ovet pidetään suljettuina.

Tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot sekä hormit ja tulisijat tulee tiivistää siten, että niiden saumat ja itse aukon peittämiseen käytettävät materiaalit ovat ilmaa läpäisemättömiä. Ilmanvaihdon aukkojen tiivistämiseen ja peittämiseen voidaan käyttää riittävän ilmanpitäviä muovikalvoja. Muovikalvojen saumat tulisi tiivistää esim. ilmanvaihtoventtiilin kaulukseen teippaamalla. Käytettävien teippien lyhytaikaisen tartuntakyvyn tulee olla riittävä, jotta aiheutettavien paine-erojen vaikutuksesta aukkojen tiivistykset eivät mittausten aikana

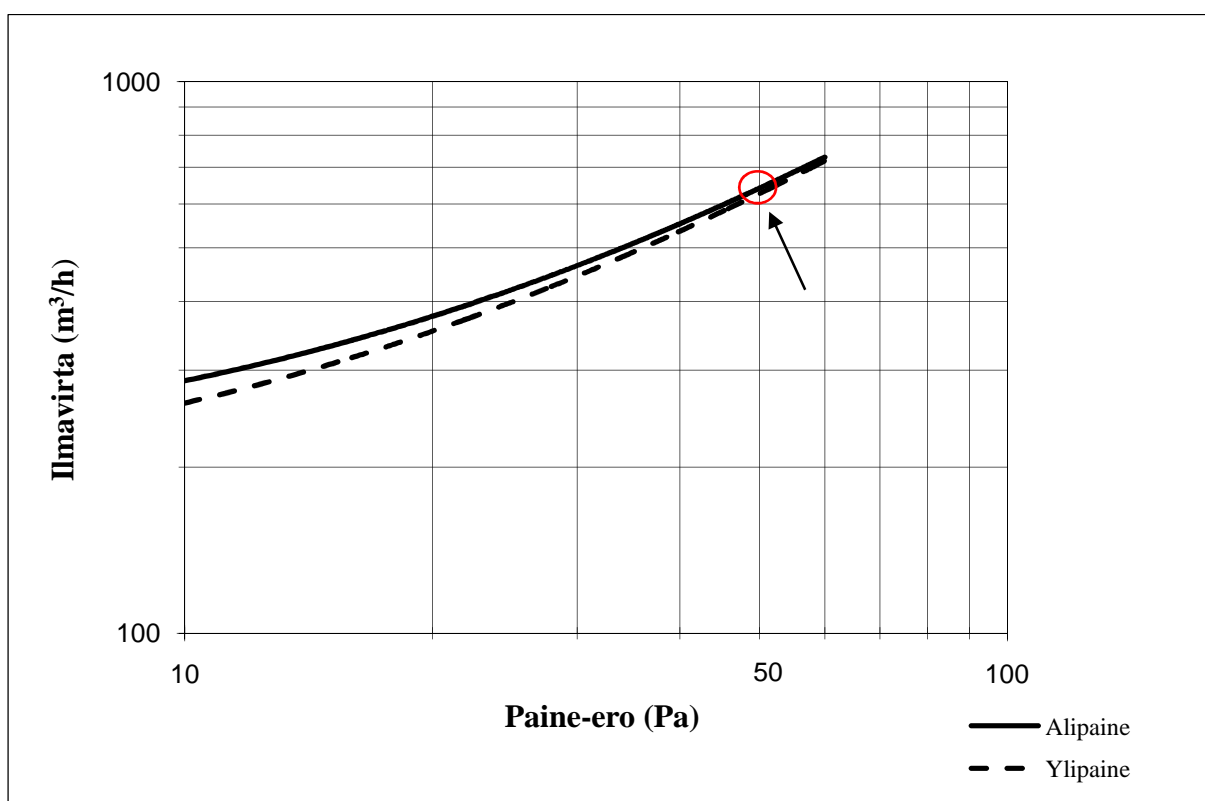
missään tilanteessa repeydy auki. Tiivistämisen toteuttamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Ilmanvaihdon aukkoja ei tule tiivistää ympäröiviin rakenteisiin liian suurelta alueelta, koska tällöin läpiviennin ja sen välisen rakenteen sauman mahdollinen hallitsemattoman ilmavuodon muodostuminen estetään mittausten aikana. Väärin tiivistetyillä esim. ilmanvaihtotenttiileillä voidaan saada vääristyneitä tuloksia edellä mainittujen ilmavuotojen osalta.

## 6.2 Painekoemenetelmän suorittaminen

Painekoemenetelmässä muodostetaan puhaltimella erisuuruisia yli- ja alipaineita ulkoilmaan nähden. Tietyn paine-eron vallitessa mitataan puhaltimen läpäisemä ilmamäärä, joka tarvitaan kunkin paine-eron ylläpitämiseksi. Ulko- ja sisätilan välinen paine-ero tulee mitata tavallisesti matalimmasta lattiapinnan tasolla harkinnan mukaan. Ulko- ja sisäpaineen vaihtelut eivät saa vaikuttaa ilmapuhaltimen toimintaan. Yleensä paine-erot mitataan korkeintaan 10 Pa:n välein. Mitattavan mittausalueen minimi ja maksimi paine-ero voi määräytyä mitattavan kohteen koosta eli tilavuudesta. Maksimi paine-eron tulisi olla aina vähintään 50 Pa, kuitenkin suositeltavaa on ottaa mittaustuloksia aina harkinnan mukaan 100 Pa:n paine-eroon asti. Näin saavutetaan mahdollisimman hyvät tulosten tarkkuudet. /16, s. 10./ Ympäristöministeriön julkaisemassa Tasauskalentaoppaassa 2007 ohjeistetaan määrittämään ilmavuotoluku 50 Pa:n alipaineessa, kuitenkin on suositeltavaa tehdä mittausta sekä ali- että ylipainetilassa. Tämä tehdään sen vuoksi, että ilmavuotoluku voi erota merkittävästi riippuen ilman virtaussuunnasta. Ilmavuotoreitit voivat joko sulkeutua tai avautua virtaussuunnan mukaan. /2, s. 11./

Usein mitattaessa suuria rakennuksia esim. asuinkerrostaloja ei saada muodostettua riittävää 50 Pa:n paine-eroa, joudutaan turvautumaan apupuhaltimen käyttöön, jotta puhalluskapasiteettia saadaan kasvatettua riittävän suureksi. Vastaavasti tässä tilanteessa voidaan hyväksyä mittauksissa suurin saavutettu paine-ero. Kuitenkin mittauksissa tulisi saavuttaa hyväksyttävä 25 Pa:n suuruinen paine-ero. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohjeessa esitetään, että rakennuksen ilmavuotoluku voidaan määrittää alle 50 Pa:n paine-erolla, jos saavutetaan vähintään 30 Pa:n paine-ero; kesäisin ulkolämpötilan ollessa suurempi kuin 15 °C ja tuulennopeuden pienempi 1 m/s on hyväksyttävää käyttää vähintään 20 Pa:n paine-eroa. /2, s. 11./ Mitattujen paine-erojen ja niitä vastaavien ilmamäärien perusteella määritetään ns. vuotokäyrät (rakennuksen sisäpuoliset yli- ja alipainekäyrät). Vuotokäyrä muodostuu paine-eron ja ilmamäärän välisestä riippuvuudesta. Graafisesti käyrät piirretään paine-ero ilmamäärän funktiona samaan log-log asteikolliseen kuvaajaan. Kuvassa 8 esitetään periaatteellinen kuvaaja. Rakennuksen tai sen osan ilmavuotoluvun mittana käyte-

tään vertailupaineessa (50 Pa) piirretyiltä kuvaajilta luettavaa 50 Pa:n kohdalta luettavaa ilmavuotolukujen (ilmamäärien) keskiarvoa. Jos 50 Pa vastaava ilmavuotoluku määritetään alemmista paine-eroista, joudutaan mittaustuloksista logaritmisella asteikolla lineaarisesti ekstrapoloimaan vuotoilmamäärä /2, s. 12./ Ilmavuotoluku ( $n_{50}$ ) saadaan, kun tutkittavan kohteen vuotoilmamäärä jaetaan tutkittavan kohteen sisätilavuudella. Luvussa 6.4 käsitellään tarkemmin ilmavuotolukujen laskentaa.



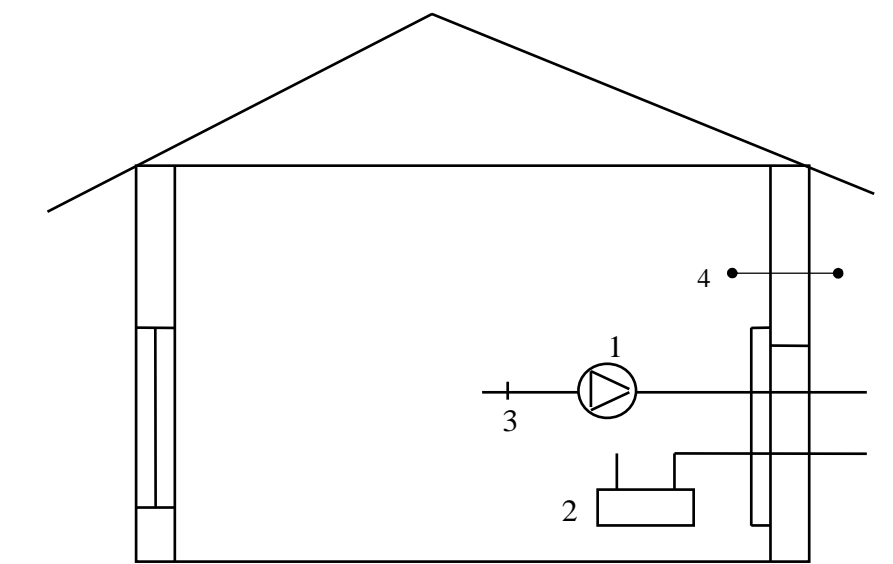
Kuva 8. Esimerkki ilmavuotokuvaajasta.

### 6.3 Painekekeessa käytettävät mittauslaitteistot

Rakennuksen tai sen osan paineistaminen voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Painekoemittauksessa voidaan käyttää esim. The Energy Conservatory:n valmistamaa laitteistoa (Minneapolis Blower Door) ja laitteen mukana tulevaa mittaustulosten rekisteröinti- ja analysointiohjelmistoa (TECTITE). Laitteisto koostuu yksinkertaisuudessaan ovikehyksestä ja siihen pingotettavasta kankaasta, jonka aukkoon puhallin voidaan kiinnittää. Suomessa mainitun laitteiston käyttäminen on yleistynyt ilmatiiveyden kenttätutkimuksissa viimeisten vuosien aikana. Kuitenkin mittauslaitteisto kokoonpanoina voidaan käyttää kaikkia soveltuvia laitteita ja niiden yhdistelmiä, kunhan ne käyttävät samoja toimintaperiaatteita ja pystyvät suorittamaan mittauksen sallituissa virhemarginaaleissa.

Laitteistokokoonpanona voidaan käyttää myös puhaltimen ja kanavan yhdistelmää, jossa on mittalaitteet ilmamäärän ja paine-eron mittaukseen. Puhaltimen ja kanavan esim. putken on keskenään toimittava niin että niiden kapasiteetit ovat riittäviä tuottamaan halutut paine-erot tutkittavalla alueella (esim. rakennus). Vaihtoehtoisesti painekokeen suorittamiseen voidaan käyttää rakennuksen omia ilmanvaihtolaitteita. Rakennusten omia ilmanvaihtolaitteita käytettäessä mittauksiin edellytetään, että ilmanvaihtojärjestelmä on keskitetty poistoilmanvaihto tai keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihto. Poistoilmanvaihtojärjestelmällä voidaan suorittaa ainoastaan rakennuksen alipainekoe. Tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä voidaan tehdä sekä ali- että ylipainekokeet. Rakennuksen omia ilmanvaihtojärjestelmiä käytettäessä on tiedettävä tarkoin järjestelmän toiminta-alue (palvelualue) eli kaikki ne tilat, joihin IV-koneen toiminta on keskitetty. Paine-eron ja ilmamäärän mittalaitteiden mittausalueen tulee soveltua mittauksen tavoitteiden mukaisiksi. Kuvassa 8 esitetään periaatteellinen mittausjärjestely.

Painekekeessa käytettäville mittalaitteille asetetaan standardissa SFS-EN 13829 /16/ vaatimuksia mittaustarkkuudelle ja mittausalueille, joiden sallituissa rajoissa mittalaitteiden ja niistä muodostuvan laitteistokokoonpanoon on oltava kykenevä toimimaan tehtävien painekoemittauksien ajan.



Kuva 9. Periaate mittausjärjestelyistä puhallinta käyttäen /8, s. 2./

Mittausjärjestelyt erillistä puhallinta käyttäen ovat seuraavat:

- 1 Säädetty apupuhallin
- 2 Ulko- ja sisäilman paine-eron mittaus
- 3 Tilavuusvirran mittaus
- 4 Sisä- ja ulkolämpötilan mittaus

Seuraavassa esitetään painekoelaitteiston eri laitteille asetettuja vaatimuksia sekä tarkennuksia:

#### ***Puhallin:***

Ilmaa pumppaava laite, joka tietyn vaihteluvälin rajoittamana pystyy muodostamaan yli- ja alipainetta rakennuskuoren tai sen osan lävitse. Puhaltimella pitäisi saada aikaiseksi pysyvä paine-ero. Puhaltimen tuottaman kapasiteetin (ilmanvirtauksen) tulee olla vähintään minimi ja maksimi paine-eroja vastaavat.

#### ***Paineen mittauslaite:***

Pystyy mittaamaan paine-eron tarkkuudella 2 Pa, mittausalueella välillä 0–60 Pa.

***Ilmavirtauksen mittauslaite:***

Laite pystyy mittaamaan ilmavirtauksen  $\pm 7$  % tarkkuudella lukemasta.

Jos mittaus suoritetaan tilavuusvirtauksena aukon läpi, tulee ilmavirtauksen arvo korjata ilman tiheyden mukaiseksi laitteen valmistajan ohjeiden mukaisesti.

***Lämpötilan mittauslaite:***

Laite pystyy mittaamaan lämpötilan tarkkuudella 1 K. Tämä tarkoittaa käytännössä, että Suomen olosuhteissa pitäisi pyrkiä vähintään mittaustarkkuuteen 1 °C. Jos mittauslaite pystyy mittaamaan tätä tarkemmin, on suositeltavaa käyttää kyseistä tarkkuutta.

***6.3.1 Paineekoe, jossa käytetään erillistä puhallinta***

Paineekokeessa tarvittava mittauslaitteisto koostuu portaattomasti säädettävän puhaltimen ohella myös paine-eromittarista, joka mittaa sisä- ja ulkotilan välistä paine-eroa. Paine-eron muodostama ilmavirtaus mitataan ilmavirtaamamittarilla puhaltimesta. Paineistettavan tilan, joka on yleensä rakennus tai sen osa, voidaan ulko-oveen tai ikkunaan sijoittaa rakennuslevy tai kehyksellä tiukasti ja tiiviisti pingotettu kangas ulko-oven karmeja vasten. Kuvassa 10 esitetään mittauslaitteisto asennettuna ulko-oveen. Suljettuun ja huolellisesti tiivistettyyn aukoon asennetaan puhallin, jolla saadaan muodostettua halutut paine-erot. Puhallin tulee asentaa ja tiivistää siten ettei esim. levyn ja puhaltimen välisestä liitoksesta pääse syntymään haitallisia ilmavirtauksia, joka aiheuttaa vääristymää ilmavirtauksen mittaukseen. Ulko- ja sisätilan välisen paine-eron mittaamiseksi asennetaan paine-eromittariin ohut muoviletku, jonka toinen pää varustetaan T-haaralla tai vaihtoehtoisesti rei'itettyyn laatikkoon sijoittamalla. Tällä kyseisellä toimenpiteellä suojataan, etteivät rakennusten ulkoisten olosuhteiden dynaaminen paine vaikuttaisi paine-eron mittaukseen. Erityisesti tuulisissa olosuhteissa on suositeltavan toimenpiteenä sijoittaa ulkotilan paineen mittauspää jonkin matkan päähän tutkittavasta kohteesta esim. n. 10 m:n päähän. Kuitenkin on huomioitava, ettei mittauspäätä sijoita lähelle muita esteitä tai niin ettei se ole alttiina suurille lämpötila eroille esim. auringon valon vaikutuksesta. /12, s. 16; 16, s. 9./

Itse painekoetta edeltävinä toimenpiteinä tehdään tarvittavat mm. tulo- ja poistoilmaventtiileiden tiivistämiset sekä muiden tarpeellisten kohteiden tiivistäminen. Tämän jälkeen voidaan alkaa paineistamaan tutkittavaa kohdetta, suunniteltujen yli- ja alipaineiden osalta esim. 10 Pa:n välein seuraavasti:  $\pm 20$  Pa,  $\pm 30$  Pa,  $\pm 40$  Pa ja  $\pm 50$  Pa. Plus-merkit tarkoittavat ylipainetta

ja miinus-merkit alipainetta. Kunkin paine-eron vallitessa mitataan puhaltimen läpäisemä ilmavirtaus. Mitattuihin ilmavirtaus tuloksiin tehdään lämpötilakorjaus, sisä- ja ulkolämpötilan sekä ilmavirtamittarin kalibrointilämpötila huomioiden. Tämän jälkeen esitetään mittaustulosten perusteella yli- ja alipainekokeiden piirretyt kuvaajat ja lasketaan 50 Pa:n kohdalta kuvaajilta ilmamäärien keskiarvo. Ilmavuotoluku  $n_{50}$  saadaan aikaiseksi jakamalla muodostunut vuotoilmavirta paineistetun tutkimuskohteen sisätilavuudella eli ns. mittaustilavuudella. /12, s. 16–17./ Lähde 12 on vuonna 1983 julkaistu, mutta mittausteiltään ja järjestelyiltään voidaan edelleenkin käyttää samoja periaatteita.

Edellä kuvatun menetelmän etuja ovat seuraavasti /12, s. 17./:

- Mittauslaitteisto on suhteellisen yksinkertainen koota.
- Menetelmä on nopea ja helppo käyttää.
- Mittauksista saadaan kvantitatiivisia (määrällisiä) tuloksia ilmavuodoista.
- Menetelmää voidaan käyttää mm. rakennusten välisessä vertailussa ja asetettujen vaatimusten todentamisessa.

Menetelmän puutteita ja reunaehtoja ovat seuraavat /12, s. 18./:

- Saatujen tulosten perusteella ei voida määrittää paikallisten ilmavuotojen sijainteja.
- Isoissa rakennuksissa joudutaan käyttämään suuria puhaltimia tai vastaavasti monia pieniä yhtä aikaa, jos halutaan koko rakennuksen mitata ulkovaipan ilmanpitävyys.
- Huoneistoissa ja huoneissa tehtävissä kokeissa väliseinien ja -pohjien vuotoilmavirratt voivat aiheuttaa huomattavia virhelähteitä.



Kuva 10. Mittauslaitteisto asennettuna oveen. Kuva: Jarmo Laamanen.  
Lupa käyttöön myönnetty.

### 6.3.2 *Painekoe, jossa käytetään rakennuksen omaa ilmanvaihtojärjestelmää*

Painekokeen suorittaminen voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa rakennuksen omia ilmanvaihtolaitteiden ja -järjestelmän puhaltimia tai puhallinta apuna käyttäen. Koneellisen poistoilmavaihdon omaavassa rakennuksessa voidaan suorittaa alipainekoe, jolloin rakennuksen kaikki tuloilmaventtiilit suljetaan ja tiivistetään huolellisesti. Vastaavasti ylipainekoe voidaan suorittaa, kun rakennuksessa on koneellinen tuloilmanvaihto. Käytettäessä koneellista tuloilmanvaihtoa, suljetaan ja tiivistetään huolellisesti kaikki poistoilmaventtiilit. Jos rakennuksessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, voidaan suorittaa sekä yli- että alipainekoeket. Muuten kaikki valmistelevat toimenpiteet, koejärjestelyt ja tulosten esittäminen tehdään erillisellä puhaltimella suoritettavaa painemenetelmän ohjeita soveltaen.

Yksi mittausten edellytyksenä on, että IV-kone tai koneet ovat portaattomasti säädettäviä. Rakennuksen omia ilmanvaihtojärjestelmiä käytettäessä suurimpana ongelmana on muiden rakennuksen läpivientien kuin tulo- ja poistoilmanvaihtoventtiileiden tiivistäminen. Huippuimurit voidaan tiivistää huolellisesti hupulla. Merkittävänä ongelmana on rakennuksen osien väliin tiivistäminen, jos vain rakennuksen tietty osa paineistetaan (IV-järjestelmän palvelualue). Tämä ongelma ilmenee erityisesti useita huoneistoja omaavissa pari- ja rivitaloissa. /8, s. 7./

Sekä yli- että alipainekokeissa ilman tilavuusvirran mittaus tapahtuu ilmanvaihtokoneelta. Mahdollisuuksien mukaan painekoetta on suositeltavaa lähteä suorittamaan ilmanvaihtokoneen minimi käyttöasennosta ja edetä portaittain ilmanvaihdon säätimen sallimissa rajoissa kohti maksimi käyttöasentoa. Kussakin käyttöasennossa mitataan sitä vastaava ulko- ja sisätilan välinen paine-ero. Mikäli mittauksissa ei saada aikaiseksi riittävän suurta paine-eroa ulko- ja sisätilan välille (50 Pa) tai mittaustulospareja (paine-ero/ilmavirta) on liian vähän – joudutaan mittaustulos ( $n_{50}$ -luku) ekstrapoloimaan esim. lineaarisen regressiosuoran avulla saatujen tulosten perusteella.

Ilmantilavuusvirran mittaamiseen voidaan käyttää mitattavan puhaltimen omaa ilmamäärämittaria tai mittausyhteitä. Ilmamäärät voidaan myös mitata paine-eromittarilla mittausyhteistä puhaltimen ominaiskäyrää käyttäen. Vaihtoehtoisesti voidaan luottaa puhaltimen omaan näyttöön, mutta suositeltavaa on käyttää kalibroitua mittaria. Ilmamäärät voidaan mitata myös merkkiainemenetelmällä. Tällöin mitataan merkkiainesyöttökonsentraatio ennen ja jälkeen puhaltimen. /8, s. 7./

Painekoe voidaan keskittää rakennuksen tiettyyn osaan, mikäli paineistettava alue kuuluu ilmanvaihtojärjestelmän palvelualueen piiriin. Yli- ja alipainekokeet toteutetaan samoja periaatteita käyttäen kuin koko rakennuksen painekokeessa. Tällöin rakennuksen osan (huoneiston) poisto- tai tuloilmaventtiileistä mitataan ilman tilavuusvirta sekä sitä vastaava ulko- ja sisätilan välinen paine-ero.

## 6.4 Paineoemenetelmän ilmavuotolukujen laskenta

### 6.4.1 Ilmavuoto- ja ilmanläpäisyluku

Painekokeessa määritetään ilman tilavuusvirta, joka täytyy puhaltaa rakennuksen sisään (yli-painekoe) tai sieltä pois (alipainekoe), jotta haluttu paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli saavutetaan /2, s. 11./ Ilman tilavuusvirrat on syytä määrittää vähintään 50 Pa paine-eroon asti tai vastaavasti lineaarisen regression avulla ekstrapoloimalla, jos vaadittavaa 50 Pa:n vertailupainetta mittauksissa ei jostain syystä saavuteta.

Ilmavuotoluku,  $n_{50}$ -luku [1/h], voidaan laskea kaavalla 1

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

missä

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

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

$V$  rakennuksen tai mitattavan osan sisätilavuus [ $\text{m}^3$ ]

Painekokeessa määritetty ilmavirtaus voidaan normalisoida rakennuksen vaipan alan (ulkoseinät, ylä- ja alapohja) suhteen. Näin muodostuu suure  $q_{50}$ -luku.

$q_{50}$ -luku voidaan laskea kaavalla 2

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_v} \quad (2)$$

missä

$q_{50}$  ilmanläpäisyluku 50 Pa paine-erolla [ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ], vaihtoehtoisesti [ $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ]

$A_v$  rakennuksen/mitattavan osan ulkovaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna [ $\text{m}^2$ ]

Painekokeen tuloksena saadaan sarja paine-eroja ja niitä vastaavia ilman tilavuusvirtauksia. Jos mittauksessa ei saavuteta 50 Pa paine-eroa, joudutaan sitä vastaava ilmavuotoluku määrittämään alemmista paine-eroista saaduista mittaustulospareista logaritmisella asteikolla lineaarisesti ekstrapoloimalla kaavan 3 mukaisen käyrän avulla.

$$\dot{V}=C \times \Delta p^n \quad (3)$$

missä

$\dot{V}$	ilman tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$C$	virtauskerroin (flow coefficient) [ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa})^n$ ]
$\Delta p$	paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkotilan välillä [Pa]
$n$	eksponentti (vaihtelee virtaustyyppin mukaan 0,5 (laminaarinen) –1,0 (turbulenttinen))

Ilmatiiveyden kenttämittaustuloksissa kappaleessa 9.2 esitetään ilman tilavuusvirran vuoto-funktio muodossa  $y=ax^b$ , jolloin vain funktion muuttujien esitysmuoto on ainoastaan erilainen.

Yleensä rakennuksen tilavuuden kasvaessa  $n_{50}$ -luku pienenee, vaikka rakennusvaipan ilmatiiveys ei parannu. Tämä johtuu siitä, että suhde  $\dot{V}_{50}/A_v$  kasvaa. Edellä mainittu suhde vaihtelee yleisesti pientaloissa välillä 0,7–1,5  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ . Kerrostaloissa vastaava suhde on tyypillisesti välillä 2,0–3,5, jos ilmatiiveys mitataan koko portaassa tai koko rakennuksesta. Ilmanläpäisyluku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmatiiveyttä suuremmissa rakennuksissa. Rakennuksen ilmatiiveyden mittaustuloksena on suositeltavaa esittää sekä  $n_{50}$ - että  $q_{50}$ -lukuna, vaikka energiaselvitystä ja -todistusta laadittaessa vertailuarvona käytetään  $n_{50}$ -lukua. Ilmavuotoluvun mittaustulokset esitetään 0,1 1/h ja 0,1  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  tarkkuudella ja pyöristetään normaalien pyöristyssääntöjen mukaan. Jos ilmatiiveyden mittaus tehdään sekä ali- että ylipainetilassa ja rakennusvaipan ilmavuotolukujen eroavaisuus on toisistaan enintään 0,5 1/h, käytetään tässä tilanteessa lukujen muodostamaa keskiarvoa ilmavuotolukuna. /2, s. 11./

Standardissa SFS-EN 13829 (2000) arvioidaan painekoemenetelmän lopullisen tarkkuuden olevan tyynissä tuuliolosuhteissa useimmiten alle  $\pm 15$  %. Tuulisissa olosuhteissa lopullinen tarkkuus voi nousta jopa  $\pm 40$  %:iin. /16, s. 16./ Rakennuksen ilmatiiveyden tutkimisessa painekoemenetelmällä saavutetaan tyynissä tuuliolosuhteissa erittäin tarkkoja ilmavuotolukujen mittaustuloksia.

#### 6.4.2 Rakennuksen tai tutkittavan alueen ilmatilavuus

Rakennuksen ilmatiiveyden tutkimusalueeksi lasketaan kaikki ne tilat, jotka ovat selvästi ilmatiiviin rakennusvaipan sisäpuolella. Yleensä tähän mitattavaan alueeseen kuuluvat kaikki lämmitetyt ja jäähdytetyt tilat sekä ne tilat, jotka kuuluvat koneellisen ilmanvaihdon palvelualueen piiriin. Jos tutkimusalueen piiriin liittyy tila, joka on erillisesti lämmitetty tai jäähdytetty ja sen ulkovaippa on lämmöneristetty, mutta se on selkeästi ilmatiiviin rakennusvaipan ulkopuolella eikä tilan rakennusvaipassa ole yhtenäistä tiivistä ilmansulkua, jätetään se mittauksen ulkopuolelle. Tällöin kyseiseen tilaan johtavat ilmanvaihtoaukot ja -venttiilit sekä tilaan johtavat kulkuaukot ja ovet tiivistetään. /2, s. 12./

Rakennuksen mitattavaan tutkimusalueeseen otetaan mukaan mm. autotallit, varastot, kellarit ja tekniset tilat, kunhan ne ovat ilmatiiviin rakennusvaipan sisäpuolella. Tämä koskee siitä huolimatta, ovatko tilat lämmitettyjä tai onko niihin erillistä sisäänkäyntiä. Tämä koskee myös loma-asuntojen yhteydessä olevia sauna- ja WC-tiloja. /2, s. 12/

Rakennuksen tai tutkimusalueen ilmatilavuus lasketaan Rakentamismääräyskokoelman osassa D5 /7/ määritetyllä tavalla. Ilmatilavuus lasketaan huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen pinta-alan tulona. Välipohjien ilmatilavuutta ei huomioida laskennassa. Rakennuksen tai tutkimusalueen poikkeaa Rakentamismääräyskokoelmassa D5 /7/ sekä myös standardissa SFS-EN 13829 /16/ esitetystä ohjeista. Ilmatilavuuden laskentaan otetaan mukaan myös alle 160 cm olevien tilojen sekä väliseinien ilmatilavuus. Alle 160 cm korkeiden tilojen huomioiminen laskennassa kuvaa paremmin tutkittavan rakennuksen todellista ilmatilavuutta. Väliseinien ilmatilavuuden huomioiminen taas helpottaa ilmatilavuuden laskentaa merkittävästi, mutta niiden aiheuttama virhe ilmatiiveyden lopputuloksissa on vähäinen. /2, s. 12/

## 7. MARKKINAKATSAUS ILMATIIVEYSMITTAUKSIIN

Suomessa laajempaa tutkimus- ja kehitystoimintaa harjoittaa VTT, yliopistot ja ammattikorkeakoulut. PK-sektorilla ilmatiiveysmittauksia harjoittavat yleensä rakennusalan suunnittelu- ja ylläpidon yritykset. Tietoa alalla toimivista yrityksistä ja oppilaitoksista on jostain syystä hankalaa löytää eri lähteistä. Tässä markkinakatsauksessa parhaaksi käytettävissä olevaksi tietolähteeksi osoittautui Internet, koska muista lähteistä esim. rakennusalan lehdistä, julkaisuista ja mainoksista ei toimintaa harjoittavia yrityksiä löytynyt.

Tiedonhaku ilmatiiveysmittauksia tekevien yritysten löytämiseksi tehtiin käyttämällä Google-hakukonetta. Hakusanoina käytettiin seuraavia: Ilmatiiveystutkimus, rakennusten ilmatiiveysmittaus ja tiiviysmittaus. Haussa kävi ilmi, että ammattikorkeakoulujen ja yliopistojen osuus ilmatiiveysmittauksissa on suhteessa pieni verrattain PK-sektoriin. Taulukossa 2 esitetään Suomessa ilmatiiveystutkimuksia tekeviä yrityksiä ja oppilaitoksia. Kaikkia ilmatiiveystutkimuksia tekeviä oppilaitoksia ei markkinatutkimuksessa ilmene, koska jotkin ammattikorkeakoulut eivät esitä tarkasti, mitä analysointi- ja rakennusteknisiä mittauksia oppilaitos tarjoaa.

Taulukko 2. Suomessa ilmatiiveystutkimuksia tekeviä yrityksiä ja oppilaitoksia.

<i>Yritys</i>	<i>Kuvaus</i>	<i>Menetelmä standardi SFS-EN 13829</i>	<i>Sijainti</i>
<b>Entec Oy</b>	Insinööritoimisto	On	Valkeala
<b>Finnenergia Oy</b>	Energian hallinta ja kun- totarkastuksia	On	Kuopio
<b>Inmeco Oy</b>	Rakennuskonsultointi	Ei ilmoitettu	Jyväskylä
<b>Makrotec Oy</b>	Insinööritoimisto	Ei ilmoitettu	Oulu
<b>Mari Hälinen</b>	Insinööritoimisto	On	Lehtoi
<b>Oulun Seudun amk</b>	Asiantuntijapalveluita	On	Oulu
<b>Paavilainen</b>	Insinööritoimisto	On	Kotka
<b>PHK-Lämpökuvaus</b>	Lämpökuvauksia ja ilma- tiiveysmittauksia	Ei ilmoitettu	Karkkila
<b>Rakennuspalvelu Hoviväri Oy</b>	Rakennuspalveluita	Ei ilmoitettu	Oulu
<b>Raksystems Antici- mex Oy</b>	Insinööritoimisto	Ei ilmoitettu	Pääkonttori, Vantaa
<b>Realtest Oy</b>	Insinööritoimisto	Ei ilmoitettu	Helsinki
<b>Rongas Oy</b>	Insinööritoimisto	On	Kotka
<b>Savonia-amk</b>	Analyysi- ja mittauspal- veluita	On	Kuopio
<b>Tampereen Teknilli- nen Yliopisto</b>	Asiantuntijakonsultaatio ja mittauspalveluita	On	Tampere
<b>Tampereen-amk</b>	Analyysi- ja mittauspal- veluita	On	Tampere
<b>Tehoinssit Oy</b>	Kiinteistönpidon asian- tuntijapalveluita	Ei ilmoitettu	Oulu
<b>Turun-amk</b>	Rakennusteknisiä mitta- uksia	On	Turku

## 8. ILMATIIVEYDEN KENTTÄMITTAUKSET

Ilmatiiveyden kenttämittaukset tehtiin tässä tutkimuksessa luvussa 6 esitetyllä painekoemennetelmällä. Kohteille tehtävät valmistelevat tiivistystoimenpiteet tehtiin standardin SFS-EN 13829 menetelmän B mukaisesti. Käytännössä menetelmää B käytetään, kun halutaan tutkia kohteen rakennusvaipan ilmatiiveyttä ja määrittää ilmavuotoluku. Ilmavuotoreittien paikallistamiseen on mahdollista käyttää myös lisäksi merkkisavua. Tutkimuksissa ilmavuotoluvun mittaamiseen käytettävä painekoelaitteisto muodostuu itse rakennetusta laitteistokokoonpanosta.

Painekoelaitteistoissa ja niiden mittaustarkkuuksissa on paikoittain suuria eroja, kun mitattava kohde on todella ilmatiivis (alle 1,5 l/h) ja tällöin mittauservojen väli on pieni. Mittauslaitteiston soveltuvuus hyvin tiiviiden kohteiden mittaamiseen tulee määritellä ilmatiiveysraportissa. Valitsevilla mittausolosuhteilla on myös suuri merkitys tulosten oikeellisuuden kannalta. /2, s. 10./

### 8.1 Oma laitteistokokoonpano

Painekoelaitteisto koostuu 315 mm:n suuruisesta kanavapuhaltimesta sekä siihen liitetystä mittauskanavasta, jossa on asennettu säädettävä iirispelti. Kanavan ja puhaltimen yhdistelmä asennetaan ja tiivistetään oviaukkoon laitettavaan vanerilevyyn. Kanavapuhallin on portaattomasti säädettävä, jonka ilman tilavuusvirta voidaan mitata mittauskanavassa olevasta iirispellistä. Iirispellin kummankin puolen välille muodostuu paine-ero, kun kanavassa virtaa ilma. Tämä paine-ero mitataan paine-eromittarilla, josta myöhemmin voidaan laskea ilman tilavuusvirta. Paine-eromittarina käytettiin nesteputkimanometria. Säädettävän kanavapuhaltimen lisäksi mittauskanavassa olevalla iirispellillä voidaan säätää tarkasti kanavassa kulkevaa ilmamäärää ja näin rakennusvaipan yli muodostuvaa paine-eroa. Jos 315 mm suuruisen puhaltimen tuoton ollessa riittämätön saamaan tarvittavaa 50 Pa:n vertailupainetta, voidaan ovilevyyn asentaa lisäpuhaltimia 315 mm ja/tai 200 mm, jotka pyörivät täydellä teholla. Tällä tavalla saadaan mitä todennäköisimmin kasvatettua puhaltimien kokonaistuotto riittäväksi. Tällöin mittauskanavassa olevaa puhallinta säädetään halutun paine-eron saavuttamiseksi rakennusvaipan yli. Liitteessä 1 esitetään piirros laitteistokokoonpanosta.

## 8.2 Mittauksen suorittaminen

Tutkimuksessa tehdyt ilmatiiveysmittaukset suoritetaan standardin SFS-EN 13829 menetelmän B mukaisesti. Kohteiden valmistelevat toimenpiteet olivat pääpiirteittäin hyvin samanlaisia, kuitenkin kohde kohtaisi poikkeuksia lukuun ottamatta. Ennen varsinaisen mittauksen suorittamista valitaan laitteistolle sopiva asennuspaikka, joka on mahdollisuuksien mukaan mahdollisimman tuulelta suojassa. Tuuli vaikeuttaa halutun paine-eron ylläpitämistä rakennusvaipan yli ja vaikeuttaa luotettavien mittaustuloksien saamista. Yleensä laitteisto asennetaan joko etu- tai takaoven aukkoon. Jos rakennuksessa on koneellinen ilmanvaihto, tulee se sammuttaa ennen kuin mittauksia aletaan suorittaa. Kuitenkin suositeltavaa on pitää ilmanvaihtokone pois päältä jokin aika, jotta muodostuneet paine-erot tasaantuisivat kunnolla. Seuraavaksi ilmanvaihtuventtiilit, liesituuletin ja tulisijat tiivistetään (teipataan) kiinni. Kokonaiset aukot tiivistetään väliaikaisesti ja merkitään niiden sijainti mittauspöytäkirjaan. Lattia-kaivoissa tulee varmistaa, että niissä on vettä. Tämän jälkeen tarkistetaan, että kaikki ikkunat ja ikkunaluukut ovat kiinni sekä kaikki rakennuksen väliovet avattu.

Seuraavaksi asennetaan laitteisto haluttuun aukkoon. Ovi-aukkoa varten tehty vanerilevy teipataan karmeihin maalarinteipillä. Kanavan ja puhaltimen yhdistelmä asennetaan vanerilevyyn tehtyyn aukkoon ja tiivistetään teippaamalla ilmastointiteipillä. Sitten asennetaan paine-eron mittausta varten tarvittavat letkut, siten että ulkotilan paineen mittausetku asennetaan riittävän matkan päähän puhaltimesta, jotta puhaltimen toiminta ei vaikuta paineen mittaukseen. Kummatkin paineen mittausetkut asennetaan rakennuksen sisäkorkeuden puoliväliin. Ennen varsinaisen mittauksen aloittamista mitataan sisä- ja ulkolämpötilat ilman tilavuusvirtojen korjaamista varten. Ulko- ja sisätiloissa olevista eri lämpötiloista johtuen tapahtuu ilman laajenemista tai tiivistymistä, kun ilmaa puhalletaan tilasta toiseen. Tämän jälkeen suoritetaan itse mittaus. Mittauksessa määritetään alipaineessa välillä 10–50...60 Pa ja 10 Pa:n välein portaisesti paine-eroja vastaavat puhaltimella tuotetut ilman tilavuusvirrat ja lasketaan niiden perusteella vertailupaineen ilmavuotoluku rakennukselle.

### 8.3 Kohteiden valitseminen

Kenttämittauksiin mittauskohteita oli tarkoitus saada n. 20 pientalon otanta, joka muodostuisi sekä vanhoista että uusista rakennuksista. Tämän tavoitteena oli laaja kuva siitä, miten rakennuksien ilmatiiveys on kehittynyt ja muuttunut vuosikymmenien aikana. Tutkimuksissa haluttiin saada myös tietoa, miten ja missä laajuudessa rakentamisen laatu ja työmenetelmien kehittyminen on parantanut rakennetyypiltään erilaisten rakennuksien lopullista ilmatiiveyttä vuosien saatossa.

Tutkimuskohteita oli tarkoituksena saada kerättyä kaupallisten ilmatiiveysmittausten yhteydessä kesän 2010 aikana. Kuitenkaan aktiivisesta markkinoinnista huolimatta – ei jostain syystä suunniteltua otantaa saatu hankittua. Syynä saattaa olla kansallisesti talouden yleinen heikko tilanne. Kuitenkin tästä huolimatta kohteita saatiin hankittua viisi kappaletta. Kyseisistä asuinrakennuksista, kaksi on rakennettu 2000-luvulla ja kolme 1990- ja 1980-luvuilla.

## 9. KOHTEIDEN TULOKSET

Ilmatiiveysmittauksien pääasiallisena tarkoituksena oli tutkia laitteiston toimivuutta ja soveltuvuutta rakennusten ilmatiiveyden mittaamiseen. Koekohteita oli kokonaisuudessaan viisi. Kohteet olivat rakennetyypiltään ja rakentamisvuodeltaan erilaisia. Rakennetyypiltään tutkimuskohteita oli kolme erilaista: Kaksi puurunkoista, yksi siporex-harkkorakenteinen ja kaksi hirsirunkoista. Kaikki kohteet olivat rakennusvaiheeltaan kokonaisuudessaan valmiita. Tutkimuskohteet pyrittiin valitsemaan siten, että ilmatiiveysmittauksia tehdään myös vanhemmissa rakennuksissa. Tällä tavoin voidaan havainnoida kuinka rakentamisen laatu ja huolellisuus on vuosikymmenien aikana kehittynyt ja parantunut merkittävästi. Tutkimuskohteet ovat kaikki yksityishenkilöiden rakentamia, jolloin rakentamisen laatu ja sen kautta saavutettu ilmatiiveys voivat näin vaihdella kohteiden välillä hyvin paljon.

Tässä luvussa esitetään kohteiden ilmatiiveyden tulokset sekä analysoidaan niitä. Tarkat tulokset, tiedot sekä pohjapiirros esitetään rakennuksesta 1 (liite 2). Jokaisesta kohteesta tehtiin mittauspöytäkirja ja tiedonkeräyslomake, joiden sisältö käydään läpi luvussa 9.1.

### 9.1 Mittauspöytäkirja ja tiedonkeräyslomake

Mittauspöytäkirjaan kirjattiin mittaustulokset, joista myöhemmin laskettiin Excel-taulukossa ilmavuotoluku ja piirrettiin vuotokuvaajat. Mittauspöytäkirja esitetään jokaisen liitteen ensimmäisellä sivulla (ks. liite 2 s. 1). Sivulla ilmenevät kohteen asiakastiedot, jotta pöytäkirja voidaan yhdistää kohteen tiedonkeräyslomakkeeseen. Pöytäkirjaan kirjataan mittaushetkellä vallitsevat olosuhdetiedot ulko- ja sisälämpötilasta sekä tuulesta. Pöytäkirjaan laitetaan muistiin kohteen kutakin paine-eroa (kohteen rakennusvaipan yli) vastaava kanavan iiriksen yli oleva paine-ero sekä iiriksen asento. Excel-taulukossa lasketaan kanavan iiriksen paine-eron perusteella sitä vastaava ilman tilavuusvirta, joka saadaan muodostettua kyseistä iiristä varten tehdyn matemaattisen kaavan avulla. Näin saadaan tehtyä valmis tiettyä paine-eroa vastaava ilman tilavuusvirta mittaustulospari. Liitteen 2 sivulla kaksi esitetään mittaustulospareista muodostetut vuotokuvaajat alipaineessa.

Tiedonkeräyslomake esitetään jokaisen liitteen sivuilla kolme ja neljä. Liitteiden sivuilla kolme esitetään mm. kyseisen kohteen asiakastiedot, kohteen rakenteelliset tiedot, laitteiston asennuspaikka, mittauksen ajankohta sekä muita perustietoja. Sivulla kolme on myös tarkastuslista standardin SFS-EN 13829 mukaisista toimista, jotka täytyy varmistaa ennen mittauksen aloittamista. Tarkistettavaksi on listattu, kuten ulko-ovien ja ikkunoiden sulkeminen ja sisäovien aukaiseminen mittauksen ajaksi. Sivulla neljä esitetään standardiin SFS-EN 13829 tehtävät poikkeukset ja muut huomioon otettavat näkökohdat. Samalla sivulla esitetään myös muut mahdollisesti tehtävät lisätyöskentelyt (savukoe ja lämpökamerakuvaus) ja heti välittömästi mittauksen jälkeen esille tulevat johtopäätökset.

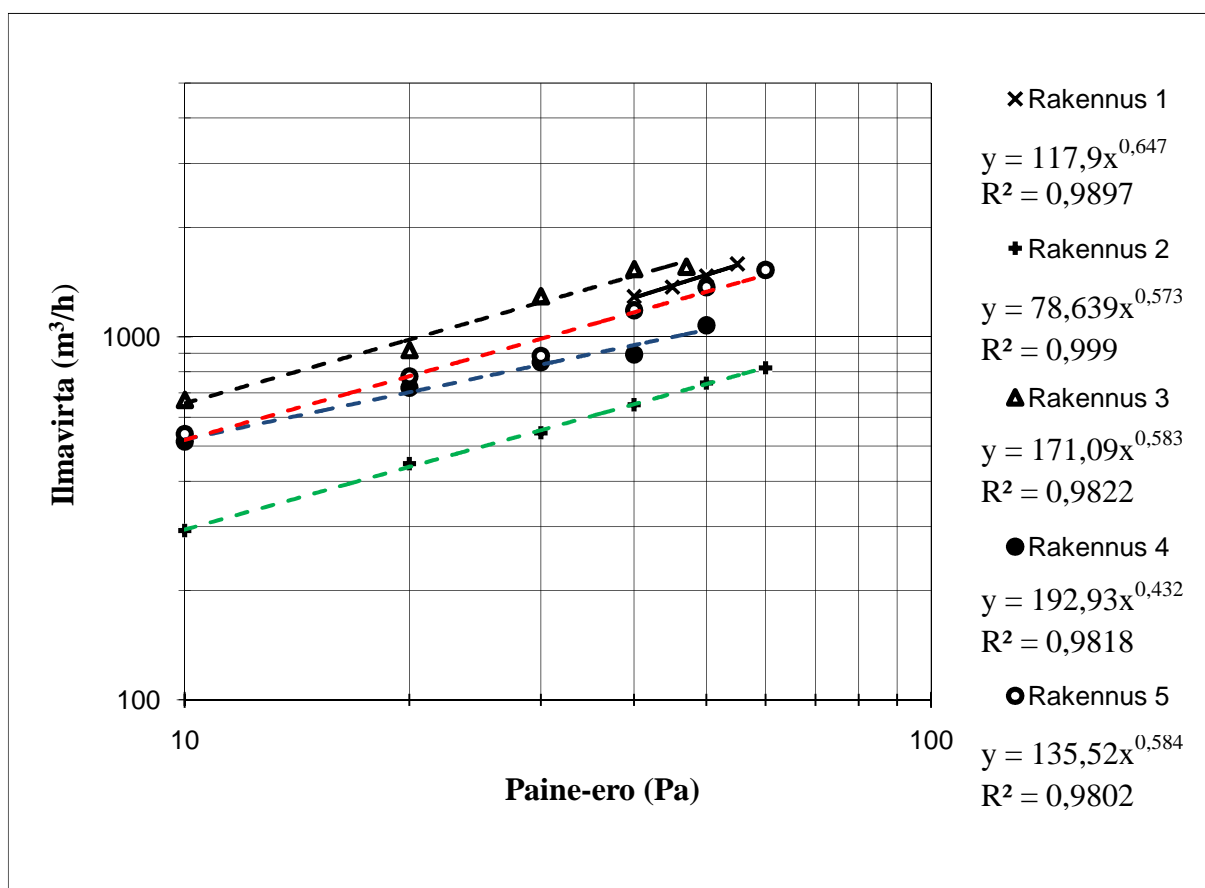
## 9.2 Kohteiden ilmavuotoluvut ja -käyrät

Taulukossa 3 esitetään kohteiden ilmatiiveysmittauksissa saavutettuja ilmavuotolukuja. Mittauksissa saavutetuissa tuloksissa on todella suuria ja merkittäviä vaihteluita, jotka voidaan selittää rakentamivuoden perusteella. Kaksi puurunkoista kohdetta on rakennettu 1980-luvun lopussa ja siporex-harkko-kohde 1990-luvun puolivälissä. Hirsikohteet on rakennettu 2000-luvulla. Näin voidaan päätellä, että hajonta rakentamisajankohdassa on vuosikymmeniä ja tässä ajassa työmenetelmät ja rakentamisen laatu ovat kehittyneet ja muuttuneet.

Taulukko 3. Kohteiden ilmavuotoluvut

Kohde	Rakennetyyppi	n <sub>50</sub> -luku [1/h]	Rakennusvuosi
Rakennus 1	Hirsirunko	4,9	2004
Rakennus 2	Puurunko	2,8	1987
Rakennus 3	Puurunko	6,4	1987
Rakennus 4	Hirsirunko	2,8	2010
Rakennus 5	Siporex-harkko	4,3	1996

Kuvassa 11 esitetään kunkin rakennuksen ilmatiiveysmittauksissa saadut mittaustulosparien kautta muodostetut vuotokäyrät lineaarisen regressiosuoran avulla ja niiden luottamusasteet. Vuotokäyrät ja niiden luottamusasteet tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Lineaarisen regression avulla voidaan mallintaa tiettyä matemaattista riippuvuussuhdetta mittaustulosparien välillä. Kuvaajan luottamusasteella ( $R^2$ ) kerrotaan, kuinka hyvin muodostettu kuvaaja sopii aineiston (mittaustulosparien) matemaattiseen arviointiin. Ilmatiiveysmittauksissa tulee saavuttaa vähintään 98 %:n luottamusaste vuotokäyrälle, kun  $n_{50}$ -luku joudutaan ekstrapoloimaan vuotokäyrää apuna käyttäen /16./ Rakennuksissa tehdyissä ilmatiiveysmittauksissa ei jouduttu käyttämään kuvaajalta ekstrapolointia, koska kaikissa mittauksissa saavutettiin standardin SFS-EN 13829  $n_{50}$ -luvun määrittämiseen tarvittava 50 Pa paine-ero. Kuitenkin muodostetuista lineaarisista regressiosuorista voidaan päätellä, että ne sopivat hyvin mittaustulosten matemaattisen riippuvuuden kuvaamiseen, vaadittavassa sopivuudessa ja luotettavuudessa.



Kuva 11. Kohteiden mittaustulosparit ja niiden kautta muodostuvat lineaariset regressiosuorat (vuotokuvaajat).

### 9.3 Tulosten tarkastelu

Yleisesti tarkasteltuna kohteiden ilmatiiveydet vaihtelivat 2,8–6,4 l/h. Rakentamismääräysten 2010 mukaista ilmatiiveyden vertailutasoa 2,0 l/h rakennettu hirsikohde 4 ei saavuttanut tätä arvoa, mutta kohteessa mitattua ilmavuotolukua ja ilmatiiveyttä voidaan pitää yleisesti vielä hyvällä tasolla. Muiden kohteiden osalta keskinäinen vertailu on hankalaa, koska kohteet on rakennettu eri vuosina. Kaikkein odottamattomin ilmavuotoluvun tulos mitattiin rakennuksessa 2. Ilmavuotoluku kohteessa oli 2,8 l/h, joka on verrattaessa kyseiseen rakennusvuoteen erittäin hyvä. Rakennukset 2 ja 3 ovat rakennusvuodeltaan sekä rakenteellisesti aivan samantaisia, mutta ilmatiiveyden osalta voidaan havaita huomattava ero. Tästä päätellään, että tuolloin on jo päästy rakenneratkaisujen osalta hyvään ilmatiiveyteen, jonka määräävät rakentamisen laatu ja tiivistystyömenetelmien huolellinen ja suunnitelmallinen toteuttaminen.

Tarkasteltaessa laitteistokokoonpanon toimivuutta ja luotettavuutta, voidaan kyseisellä mittausmenetelmällä saavuttaa luotettavia ilmatiiveyden mittaustuloksia, suhteellisen yksinkertaisesti käytettävällä mittauslaitteistolla. Kohteiden mittaustulosten perusteella muodostetut vuotokuvaajat (lineaariset regressiosuorat) ja niiden luottamusasteet ( $R^2$ ) saavuttivat yli 98 % tarkkuuden, jolloin mittaustulosparien keskinäinen yhteneväisyys on erittäin luotettava (ks. liite 2 s. 3). Tuuliset olosuhteet ja etenkin puuskittainen tuuli vaikeuttivat aina välillä luotettavien mittaustulosten saamista.

Ilmatiiveystutkimuksien yhteydessä tuli esille monia laitteistokokoonpanon mittalaitteita koskevia kehitysmahdollisuuksia. Paine-eron mittaamiseen käytettävästä nesteputkimanometrista olisi suositeltavaa siirtyä käyttämään digitaalista paine-eromittaria, jolloin paine-eron mittaaminen helpottuu ja nopeutuu merkittävästi. Kuitenkaan siirryttäessä digitaaliseen mittariin siirryttäessä ei käytännössä saavuteta merkittävää paine-eron mittaustarkkuuden paranemista, eikä näin ollen vastaava merkitystä mittaustuloksiin. Mittauslaitteiston asentamista oviaukkoa varten käytettävä vanerilevy ei ole käytännöllinen. Oviaukkoon olisi hyvä kehittää vaaka- ja pystysuunnassa säädettävä kehys, jolla kangas tai muovi pingotetaan oven karmeihin tiukasti ja tiiviisti.

## 10. YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia asuinrakennusten ilmatiiveyttä painekoemenetelmällä ja sen määrittämistä rakennetulla laitteistokokoonpanolla. Rakennuksen ilmatiiveyttä kuvataan  $n_{50}$ -luvun (ilmavuotoluku) avulla. Ilmavuotoluku kertoo yksinkertaisesti, kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen sisäilmatilavuus virtaa rakennusvaipan lävitse. Rakennuksen ilmavuotojen määrällä on hyvin suuri merkitys energiankulutukseen, sisäilmaston laatuun ja asumisviihtyvyyteen. Rakennuksen hyvä ilmatiiveys voidaan varmistaa ammattitaitoisella ja huolellisella rakentamisen laadulla ja asianmukaisilla työmenetelmillä. Kaikilla rakentamisessa käytettävillä asuinrakennuksien rakennetyypeillä ja -ratkaisuilla voidaan saavuttaa ilmatiiveydeltään erittäin korkea taseisia rakenteita ja rakennuksia. Kehittyneillä suunnitteluratkaisuilla ja työmenetelmien kehittämällä ja tutkimisella voidaan tulevaisuudessa mahdollistaa entisestään rakennuskantamme uudistuotannon kautta päästä erinomaisiin arvoihin ilmatiiveydessä.

Mielestäni ilmatiiveyden kenttätutkimukset sujuivat hyvin. Kuitenkin osaa mittauksia häiritsi usein tuuli, jonka vuoksi tulosten luotettavuus heikkeni. Tutkimuksia tehtäessä hankalaa oli asentaa vanerilevyä oviaukkoon, koska hyvin usein oven karmit eivät olleet aivan suoria ja niiden kulmat suorakulmaisia. Kaikkein eniten hankaluuksia aiheuttivat liesituulettimien ja tulisijojen tiivistäminen. Liesituuletin tiivistettiin rasvasuodattimen ympäri liesikupuun, mutta itse liesikupurakenteen ilmatiiveyttä ei tarkasti pystytty varmistamaan. Tulisijojen luukkujen tiivistäminen muovikalvolla oli helppoa, mutta itse kalvon tiivistäminen tulisijan saumapintaan (tiilitulisijat) oli vaikeaa, johtuen suuresta tiilien välisestä saumamäärästä. Ilmanvaihtoventtiileiden ja -kanavien tiivistäminen onnistui hyvin. Tästä herää kysymys, kuinka ammattitaitoisesti ilmatiiveysmittauksia yleensä tehdään, sillä mittaajien valvontaa suoritetaan vähän. Tästä johtuen ilman kulkeutumisreittien tiivistämisessä käytännössä esiintyy hyvin paljon eroavaisuuksia.

Tutkimukselle asetetut tavoitteet saavutettiin mielestäni hyvin. Opinnäytetyön tekemisen aikana opin käyttämään ilmatiiveysmittauksissa käytettäviä mittalaitteita ja kuinka käytännön kenttätutkimuksissa mittausprosessi viedään asuinrakennuksessa kokonaisuudessaan läpi. Lisäksi työn edistyessä jouduin perehtymään asuinrakennusten rakenteellisen ilmatiiveyden toteuttamisen pääperiaatteisiin. Ilman syvällisempää asiantuntemusta rakennetekniikasta on hyvin vaikeaa käsittää, mistä asuinrakennuksen rakennusvaipan ilmatiiveys kokonaisuudessaan muodostuu.

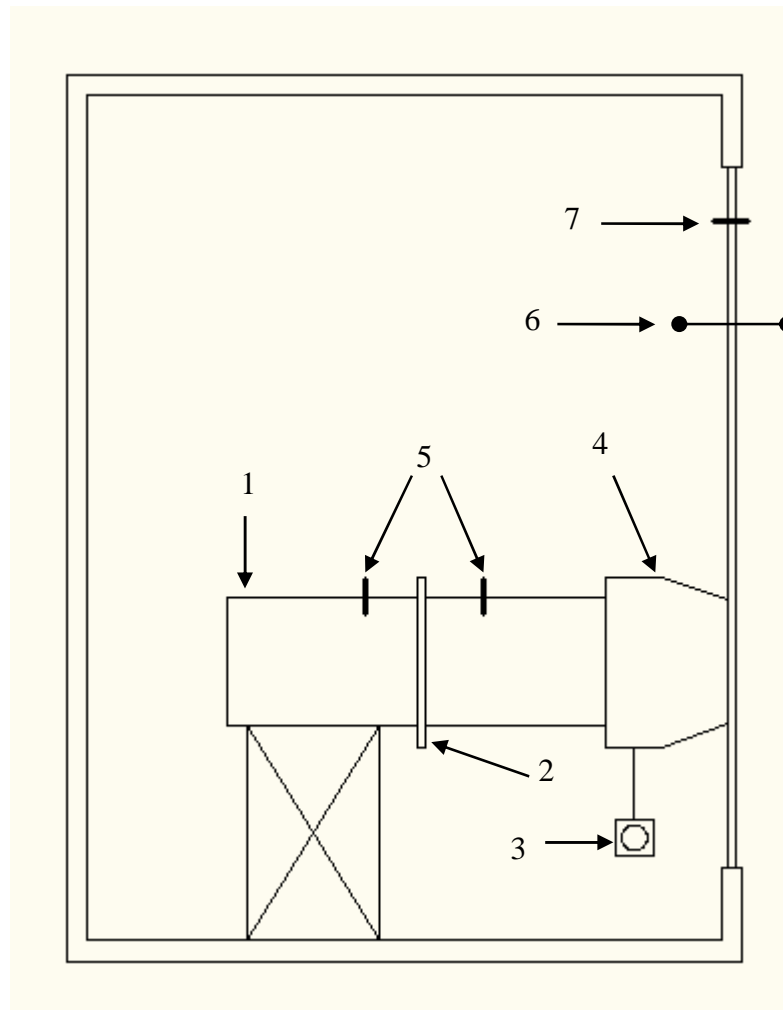
Tulevaisuudessa ilmatiiveysmittaukset tulevat, mitä todennäköisimmin yleistymään tai jopa olemaan pakollisia rakennuksen energiatodistuksia laadittaessa. Energiamääräysten uudistuksessa ja tiukentuessa tarve ilmatiiveysmittauksille tulee kasvamaan huomattavasti. Rakennusmateriaalien eristyskyvyn ja lämmityslaitteiden energiatehokkuuden parantuessa tulee ilma-  
vuotojen merkitys kasvamaan entisestään. Rakennuksen energiatasetta kompensoidessa tulisi jo suunnitteluvaiheessa ottaa yhdeksi tärkeimmäksi rakennustöiden laadun ja seurannan osaluueeksi ilmatiiveyden tarkastelu.

## LÄHTEET

1. Siikanen, Unto, *Rakennusfysiikka*. Helsinki: Rakennustieto Oy. 1996.
2. *RT-80-10974*. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Ohjeet. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy. Lokakuu 2009.
3. Immonen, Markus, *Paine-eron vaikutus ilmanvuotokohdan ympäristön pintalämpötilaan*. Insinööritoimisto. Helsingin ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakennustekniikka. 2008.
4. Jorma Pietiläinen ym., *ToVa-käsikirja*. Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. Tiedotteita 2413. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 2007.
5. Suomen rakentamismääräyskokoelma. D2. *Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Määräykset ja ohjeet 2010. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
6. Aho, Hanna – Korpi, Minna (toim.), *Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa*. Tutkimusraportti 141. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 2009.
7. Suomen rakentamismääräyskokoelma. D5. *Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta*, Ohjeet 2007. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.
8. Kauppinen, Timo ym., *Rakennusten ilmanpitävyys ja energiatehokkuus*. Rakennusfysiikka 2009 – Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. Rakennusfysiikka seminaari 2009, Tampere 27.–29.10.2009.
9. Seppänen, Olli – Seppänen, Matti, *Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka*. 2. korjattu painos, Helsinki: Sisäilmayhdistys ry. 1997.

10. Vinha, Juha ym., *Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys*. Tutkimusraportti 131. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laboratorio. 2005.
11. Vinha, Juha ym., *Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous*. Tutkimusraportti 140. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 2009.
12. Polvinen, Martti ym., *Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyys*. Tutkimuksia 215. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 1983.
13. Tremco illbruck Export Ltd. 9.11.2007 [viitattu 6.5.2010].  
*Tietoa suunnittelijoille > Tekniset tiedotteet > Kirjasto > Paisuvat nauhat ja foilit > Log Cabin Tape.pdf*. Saatavissa: [http://www.tremco-illbruck.fi/celumdb/documents/LOG\\_CABIN\\_TAPE\\_TDS\\_FIN\\_8359.pdf](http://www.tremco-illbruck.fi/celumdb/documents/LOG_CABIN_TAPE_TDS_FIN_8359.pdf)
14. Honka Taloma Oy. Flax – Pellavatuotteet [viitattu 6.5.2010].  
*Etusivu > Pellavanauhat*. Saatavissa: <http://www.honkataloma.fi/pellavanauhat.htm>
15. Suomen rakentamismääräyskokoelma. E3. *Pienten savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus*. Määräykset ja ohjeet 2007. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto ja rakennusosasto.
16. *SFS-EN. 13829*. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). European Committee for Standardization. 2000

## Liite 1. Piirros rakennetusta laitteistokokoonpanosta



Yllä kuvattu laitteistokokoonpano on seuraava:

- 1 Mittauskanava
- 2 Säädetty iirispelti
- 3 Kierrosnopeuden säädin
- 4 Kanavapuhallin
- 5 Mittausyhteet iiriksen yli olevan paine-eron mittaamiseksi (nesteputkimanometri)
- 6 Ulko- ja sisätilan välisen paine-eron mittausyhteet (nesteputkimanometri)
- 7 Vanerilevy oviaukossa

Asiakastiedot:

Nimi: Rakennus 1

Osoite: Rakennus 1

Paikkakunta: Rakennus 1

Puhelin: Rakennus 1

Huomautuksia:

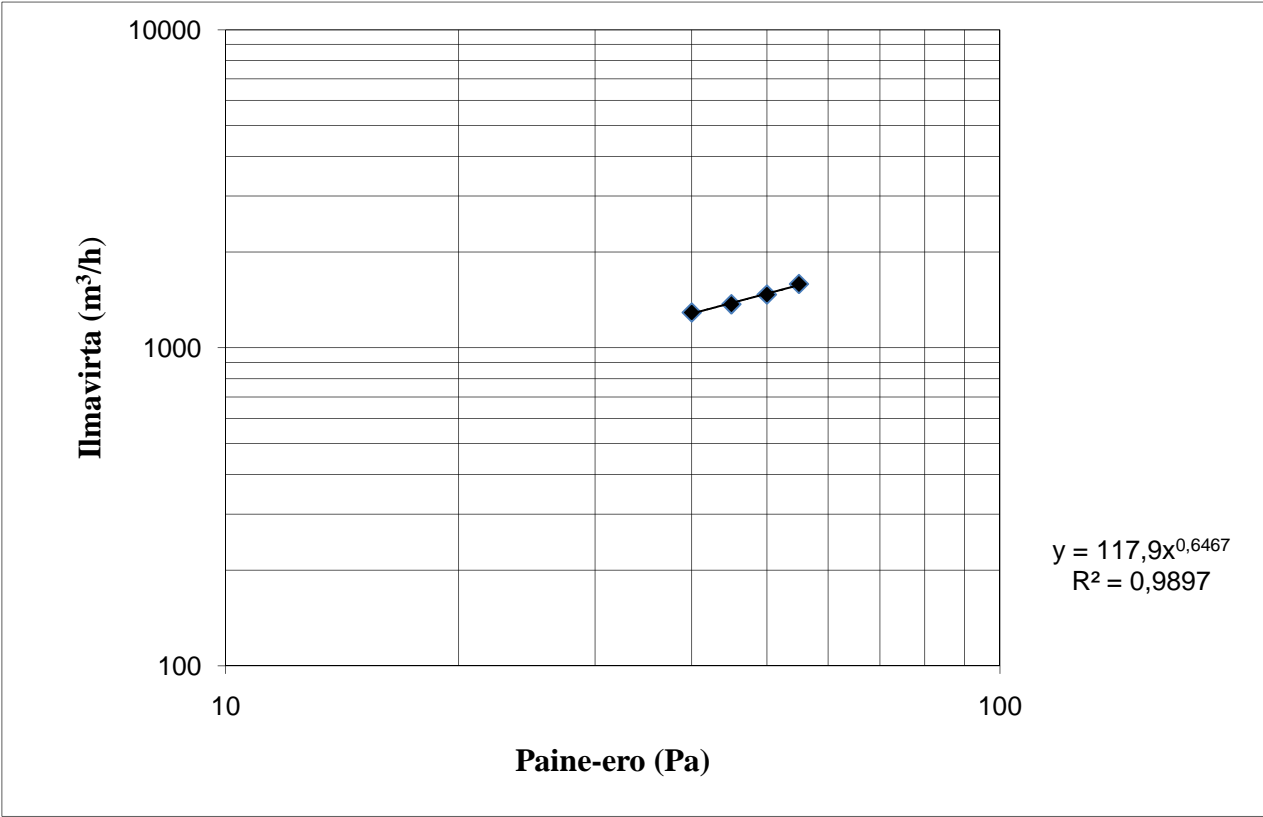
Selluvillalla lisäeristetty omakotitalo

Alipaine (X)      Ylipaine ( )

Alipaine ( )      Ylipaine ( )

Paine-ero (Pa)	Iris asento	Iris paine-ero (Pa)	Puhallin
40	4	13	+200
45	4	17	+200
50	4	23	+200
55	4	31	+200

[illegible]



Asiakastiedot:

Nimi/Yritys	Rakennus 1
Lähiosoite	Rakennus 1
Postinumero- ja toimipaikka	Rakennus 1

Kohteen tiedot

Rakennuksen lähiosoite	Rakennus 1
Rakennuksen postinumero- ja toimi- paikka	Rakennus 1
Päivämäärä/kellonaika	2.6.2010 klo 17.40
Ilmanvaihtojärjestelmä	Painovoimainen tehostettuna liesituulettimella
Rakennusvuosi	2004
Rakennuskorkeus (m)	2,75
Tutkimusalue	Koko rakennus
Mittaustyyppi – A/B	B
Puhaltimen asennuspaikka	Ulko-ovi
Nettotilavuus – m3	300
Nettopinta-ala – m2	100
Seinärakenne	Hirsi
Alapohjarakenne	Maan varainen laatta
Yläpohjarakenne	Puurakenne
Rakennuksen tila mittaushetkellä	Valmis

Rakennepiirros (X)

Käytetyt mittalaitteet:

Lämpötila	Kohteen omat
Tuulen suunta ja nopeus	Havainto(arvio)

**Rakennuksen valmistelu mittaukseen**

Ulko-ovet ja ikkunat suljettuina	(X)	Ulkoilmakanavat tiivistetty	( )	Postiluukku tiivistetty	( )
Ikkunoiden tuloilmaventtiilit suljettu ja tiivistetty	(X)	Tulo- ja poistoilma-aukot tiivistetty	(X)	Savuhormin ilmanvaihtotenttiilit tiivistetty	( )
Luukut ja ullakkoportaat suljettu	( )	Tuulettimen ilmanvaihtoputket tiivistetty	(X)		
Sisäovet lämmitetyissä tiloissa auki	(X)	Liesituuletin tiivistetty	(X)		
Lattiakaivot tiivistetty tai täytetty vedellä	(X)	Tulisija ja tuhkaluukut tiivistetty	(X)		
Viemäriputkien tuuletusaukot tiivistetty	( )	Ovet lämmittämättömiin kellareihin ja tiloihin suljettu	(X)		
Mekaaniset ilmastointilaitteet suljettu	(X)	Tuhkat avoimista takoista poistettu	( )		

