

Markus Immonen

Rakennuksen vaipan ilmatiiviyden vaikutus energiatehokkuuteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (ylempi AMK)

Rakentamisen koulutusohjelma

Opinnäytetyö

29.11.2013

Author(s) Title Number of Pages Date	Markus Immonen Impact of Air-Tightness of the Building Envelope on Energy-Efficiency 67 pages + 1 appendices 29 November 2013
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Renovation
Instructor(s)	Hannu Hakkarainen, Principle Lecturer
<p>This final thesis was carried out for Metropolia University of Applied Sciences. Metropolia University of Applied Sciences is an international institute that combines technology, business, economics and culture. Laboratory of department of Civil Engineering offers air-tightness measurement services.</p> <p>The aim of the thesis was to find out how change in the calculation and measurement basis from air-tightness figure (n50) to (q50) affects a building's' air-leakage results and hence their energy-efficiency. The objective was to determine how changes in these verification values really affect the development of the building's' air-tightness and to gain knowledge and material for both teaching- and research purposes and for Metropolia Laboratory's service activities. Impact of the two very different approaches of air-leakage measuring aspects found in building codes was especially studied in the case of multi-story-buildings.</p> <p>The study began by reviewing building regulations, building physics, air-tightness norms and other literature. Also the most common air-leakage points in building envelope that had been found in air-tightness measurements was studied. Real measurement data was collected from certified air-tightness measurers working in the field. Altogether results were gained from more than a thousand buildings including 725 single-family houses, 112 terraced and semi-detached houses, 55 apartments, 61 multi-story buildings and 83 other buildings.</p> <p>In result, information was found on how the change in air-tightness calculation method affects different building types. Outcomes include insight on how the calculation and measuring methods of air-tightness of two very different multi-story buildings affect the received values. The results show that air-tightness of building envelope has a very large effect on the whole energy economy.</p>	
Keywords	The Building envelope airtightness, Airtightness, Air Leakage Rate

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen taustaa	2
3	Tutkimuksen teoriaa	3
3.1	Rakentamismääräykset ja ohjeet	3
3.1.1	Ilmatiiviys	3
3.1.2	Miksi tiiviiksi?	4
3.1.3	Ilmanvaihto	6
3.1.4	Painesuhteet	7
3.1.5	Energiatehokkuus	8
3.2	Rakennuksen ilmanpaineet	9
3.3	Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät	12
3.4	Rakennuksen fysiikka; lämpöfysiikka	16
3.5	Rakennuksen fysiikka; kosteus	16
3.5.1	Vesihöyrykosteuden siirtyminen rakenteisiin	17
3.5.2	Konvektio	17
3.5.3	Diffuusio	19
3.5.4	Kondensoituminen	20
3.5.5	Vesihöyrynläpäisevyys $\text{kg m} / \text{m}^2\text{sPa}$	21
3.5.6	Vesihöyrynvastus $\text{m}^2\text{sPa} / \text{kg}$	21
3.6	Rakenteiden ilmatiiviys	22
3.6.1	Ilmanvuotoluku	24
3.6.2	Ilmansulkumateriaalina muovi- tai bitumikalvo	25
3.6.3	Ilmansulkupaperi	25
3.6.4	Rakenteiden ongelmakohtia	26
3.7	Rakennusten vaipan ilmatiivyyden mittaaminen	28
3.7.1	Ilmanvuotoluvun mittaustavat ja menetelmät	29
3.7.2	Painekokeen toteutus ja ilmanvuotoluvun laskeminen	31
3.7.3	Ilmatilavuuden laskeminen mittausta varten	33
3.7.4	Tiiviysmittausraportin sisältö	35
3.7.5	Mittalaitteiden tarkkuus ja kalibrointi	36
3.7.6	Pientalojen mittausohjeet	37
3.7.7	Kerrostalojen mittausohjeet	38

4	Tutkimuksen toteutus ja tulokset	44
4.1	Pientalot	46
4.2	Puurunkoiset 1 krs pientalot	48
4.3	Puurunkoiset 1,5- 2 krs ja kellarilliset pientalot	50
4.4	Kivirunkoiset pientalot	53
4.5	Hirsitalot	54
4.6	Kerrostalot	55
4.7	Kerrostalon mittaaminen eri menetelmillä	57
4.8	Kivi- ja puurakenteisten kerrostalojen ilmatiiviys	59
4.9	Muut rakennukset	60
5	Yhteenveto	62
5.1	Pientalot	62
5.2	Kerrostalot	63
5.3	Muut rakennukset	63
	Lähteet	67
	Liitteet	
Liite 1	Lomake, tiiviysmittaustuloksia	

Oleskeluvyöhyke	On se osa huonetilasta, jossa sisäilmastovaatimukset on suunniteltu toteutuvaksi. Yleensä se on vähintään huonetilan osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 m:n korkeudella lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista.
Painekoe	Rakennuksen ilmanpitävyyteen kehitetty koe, jossa rakennus ali- tai ylipaineistetaan, jotta vaipan ilmanpitävyyttä voidaan tutkia.
Rakennuksen vaippa	Rakennuksen vaipan muodostavat ne rakennusosat, jotka erottavat lämpimän, puolilämpimän, erityisen lämpimän tai jäähdytettävän kylmän tilan ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta. Vaippaan eivät kuulu rakennuksen sisäiset erilaisia tiloja toisistaan erottavat rakennusosat.
Rakennuksen vaipan ala	Rakennuksen vaipan ala lasketaan ulkoseinät aukotuksiin ja alapohja ja yläpohja sisämittojen mukaan laskettuna.
Tasauslaskenta	Rakennuksen lämpöhäviöiden tasaus on laskennallinen menettelytapa lämpöhäviölle asetetun vaatimuksen täyttämiseksi. Jonkin osatekijän (vaippa, vuotoilma, ilmanvaihto) vertailulämpöhäviötä suurempi lämpöhäviö edellyttää vähintään vastaavaa lämpöhäviön vähentämistä toisen osatekijän kohdalla.
Tiiviysmittaus	Rakennuksen ulkovaipan ilmanvuotoluvun n_{50} ja q_{50} määrittäminen 50 Pa paine-erossa (tai ilmavuotokohtien etsiminen muussa, käyttötilannetta suuremmassa alipaineessa).

1 Johdanto

Metropolia Ammattikorkeakoulu on pääkaupunkiseudulla toimiva kansainvälinen ja monialainen ammattikorkeakoulu, jossa koulutetaan kulttuurin, liiketalouden, sosiaali- ja terveysalan sekä tekniikan asiantuntijoita ja kehittäjiä.

Tämä opinnäytetyö tehdään Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n Rakennustekniikan koulutusohjelmalle.

Metropolia Ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratorio tekee rakennusten vaipan ilmatiivyyden mittauksia opetusmielessä sekä tarjoaa mittauspalveluja maksullisena palvelutoimintana. Tästä palvelutoiminnasta kertyneitä varoja käytetään mm. tutkimustyöhön ja kehittämään edelleen ko. palvelutoimintaa.

Ilmatiivyyden mittauksella todettava ilmanvuotoluku kertoo, kuinka tiivis rakennuksen vaippa on. Hyvä tiiviyys mahdollistaa sen, että rakennuksessa ei tarvitse lämmittää hallitsematonta, talviaikana kylmää, rakenteiden läpi virtaavaa vuotoilmaa. Lisäksi rakenteissa olevat epäpuhtaudet eivät pääse sisäilmaan.

Ilmatiivyyden vaikutuksesta rakennuksen energian tarpeeseen on tehty tutkimuksia aikaisemminkin, mutta sitä miten ilmanvuotoluvun laskentaperusteen (n_{50}) muuttaminen (q_{50}) vaikuttaa rakennuksen ilmatiivyyteen ja sen kautta energiatehokkuuteen ei ole aikaisemmin tutkittu. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään tätä asiaa.

Tutkimuksessa perehdytään rakentamismääräyksiin ja ohjeisiin sekä kerätään toteutunutta mittaustietoa alan sertifioiduilta rakennusten ilmatiivyyden mittaajilta.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten muuttuneet rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun laskentaperusteet vaikuttavat rakennusten vaipan ilmatiivyyden kehitykseen ja mitä eroa on kerrostalojen kahden eri mittaustavan, huoneistokohtaisen ja rakennuskohtaisen, välillä sekä saada tietoa ja materiaalia opetus- ja tutkimustyöhön ja laboratorion palvelutoimintaan.

2 Tutkimuksen taustaa

Tutkimuksia rakennuksen vaipan ilmatiiviyden vaikutuksesta energiatehokkuuteen on tehty aikaisemminkin. Tampereen tekninen yliopisto on tutkinut tutkimuksessaan ”Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpöolosuhteet sekä ilmanvaihto ja ilmatiiviyys”, joka käsitti 100 pientaloa, rakennusten ilmanpitävyyden vaikutusta energiatehokkuuteen. Lisäksi suuret tutkimuslaitokset Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) rakennustekniikan laitoksen ja Teknillisen korkeakoulun (TKK) LVI-tekniikan laboratorion yhteisissä tutkimushankkeissa ”Kosteusvarma terve pientalo” ja ”AISE – Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous” on tehty laajoja mittauksia uudehkoissa pien- ja kerrostaloissa muun muassa rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyyden osalta. Lisäksi on tehty varsin mittavia tutkimuksia 50 kivirakenteisen pientalon, 20 hirsitalon ja 56 kerrostaloasunnon sisäilman olosuhteista, ilmanpitävyydestä ja ilmanvaihdon toimivuudesta kenttämittauksin vuosina 2005–2008 Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Rakennetekniikan ja Teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen LVI-tekniikan yhteistyöhankkeessa.

Edellä mainittujen tutkimusten perusteella ja laajoihin tiivysmittaajien havaintoihin perustuen monien uusienkin pientalojen ilmatiiviydessä löytyy parantamisen varaa. Ilmanvuotokohdat aiheuttavat energiahukkaa ja heikentävät asumusviihtyvyyttä sekä tuovat sisäilmaan epäpuhtauksia. Lisäksi rakennuksen vaipan ilmatiiviyys vaikuttaa erittäin oleellisesti vaipan kosteustekniseen toimivuuteen.

Rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun laskentaperusteet muuttuivat 1.7.2013. Aikaisemmin rakennuksen ilmanvuotoluku laskettiin jakamalla vuotoilmamäärä rakennuksen ilmatilavuudella. Nyt voimassaolevassa rakentamismääräyskokoelman osassa D3 luvussa 3.5 ohjeistetaan ilmanvuotoluvun laskeminen siten, että ilmanvuotoluku saadaan jakamalla vuotoilmamäärä rakennuksen vaipan pinta-alalla.

Aikaisemmin ei ole selvitetty, mikä vaikutus laskentaperusteiden muutoksella on ilmanvuotolukuun ja sen seurauksena rakennusten ilmatiiviyteen. Tässä tutkimuksessa selvitetään tätä asiaa.

3 Tutkimuksen teoriaa

3.1 Rakentamismääräykset ja ohjeet

Kaikessa rakentamisessa on määritelty tietyt vaatimukset ja raja-arvot, joiden puitteissa rakennukset on toteutettava. Tässä on esitetty tutkimusalueeseen keskeisesti kuuluvia rakentamismääräyksiä ja ohjeita.

3.1.1 Ilmatiiviys

Rakennusten ilmantiiviyden määrittäminen rakennusten laadunvalvonnassa on yleistynyt merkittävästi muutaman vuoden sisällä. Rakennuksen vaipan tiiviystä on puhuttu jo kauan, mutta vasta energiatodistuksen myötä ilmatiiviyden todentaminen on yleistynyt. Suomalaiseen rakentamistermistöön on pesiytynyt käsite ”pullotalo”, jota on käytetty negatiivisessa tarkoituksessa puhuttaessa ilmatiiviistä taloista. Käsite johtuu hyvin pitkälle siitä, että rakennuksissa ei ole huolehdittu riittävästä ilmanvaihdosta ja on tehty muitakin virheitä. Ilmatiiviys itsessään ei aiheuta rakennukseen ongelmia. ”Pullotalo”-termin negatiiviset taustat ovatkin todelliset ajoilta, jolloin ilmanvaihdosta ei huolehdittu. [Paloniitty 2012.]

Energiatehokkuusajattelu ja energiatehokkuuden toteutuminen on arkipäivää 2000-luvulla myös suomalaisessa rakentamisessa ja vaipan ilmatiiviys ja sen todentaminen on yksi osa rakennuksen energiatehokkuutta. Passiivitalojen tapauksessa, joissa energiatehokas koneellinen ilmanvaihto takaa hyvän sisäilman laadun ja rakennuksen vaipan riittävä tiiviys rakenteiden toimivuuden, voitaneen käyttää termiä ”termospullotalo”. [Paloniitty 2012.]

Rakennusvaipan ja tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, että vuoto-kohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille, rakenteille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulkukerros. [RakMk D3 2012: 10.]

Rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} voi olla enintään $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Ilmanvuotoluku voi ylittää arvon $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, mikäli rakennuksen käytön vaatimat rakenteelliset ratkaisut huonontavat merkittävästi ilmanpitävyyttä. [RakMk D3 2012: 10.]

Pienempi ilmanpitävyys (ilmanvuotoluvun arvo) voidaan osoittaa mittaamalla tai muulla menettelyllä. Asuinkerrostaloissa ilmanpitävyys voidaan osoittaa mittaamalla vähintään 20 % huoneistoista. Ilmanpitävyyden mittaus voidaan suorittaa myös rakennuksen omilla ilmanvaihtokoneilla. Käytettäessä rakennuksen omia ilmanvaihtokoneita voidaan enintään 25 % rakennuksen tilojen lämmitetystä netto-alasta rajata pois mittauksesta. Jos ilmanpitävyyttä ei osoiteta mittaamalla tai muulla menettelyllä, rakennusvaipan ilmanvuotolukuna käytetään $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. [RakMk D3 2012: 10.]

Ilmanpitävyyden osoittaminen muulla menettelyllä voi tarkoittaa esimerkiksi teollisen talonrakennuksen laadunvarmistusmenettelyä, jolla ilmanpitävyys voidaan arvioida ennakoita luotettavasti.

Tasauslaskennassa ilmanvuotoluvun vertailuarvo on $2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$.

Rakennuksen ilmanvuotoluku on yksikäsitteinen ja yksinkertaisesti mitattavissa oleva suure, jonka avulla rakennuksia voidaan verrata keskenään.

3.1.2 Miksi tiiviiksi?

Hyvän ilmatiiviyyden saavuttaminen rakennuksen vaipparakenteissa on tärkeä useastakin syystä. Tärkeimpänä yksittäisenä tekijänä voidaan pitää rakennuksen vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistamista riittävällä oikein tehdyllä ilmatiiviydellä. Kun ollaan siirtymässä entistä paremmin eristäviin vaipparakenteisiin, tulee hallitsemattoman vuotoilman kulkeutuminen vaipparakenteen sisään estää, näin välttämään rakenteiden kosteus- ja homevaurioriskeiltä. Nykyisten asumistottumusten seurauksena sisäilman kosteuslisä voi olla talviaikana jopa $4\text{-}5 \text{ g/m}^3$ sisäilmassa, jolloin kosteuskonvektion riski kasvaa. Jos vaipparakenteissa on ilmapuoreittejä, kulkeutuu sisäilman kosteus helposti ilmapuoreitteiden mukana kylmiin rakenteisiin ja rakenteiden osiin aiheuttaen kosteusvaurioriskin. Hyvän ilmanpitävyyden seurauksena kostea sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin ja toisaalta taas kylmä ulkoilma ei pääse jäädyttämään rakennetta ja aiheuttamaan materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin homeen kasvulle otollisia olosuhteita tai kosteuden tiivistymisriskiä. [Paloniitty 2012.]

Sisäilman vesihöyryn haitallisen konvektion estämiseksi on rakennuksen vaipan ja sen yksityiskohtien oltava niin tiiviitä läpikulkevien ilmapuotojen suhteen, että rakennus on mahdollista pitää pääsääntöisesti alipaineisena. Rakennuksen ulkopinnan ja sen yksityiskohtien on estettävä veden ja lumen haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin myös tuulen vaikutuksesta. [RakMk C2 1998: 4.]

Rakennuksen ulkoseinän ja sen eri kerrosten sekä ulkoseinään liittyvien muiden rakenteiden ja ulkoseinän liitosten ilmatiiviyden ja vesihöyrynvastuksen on oltava sellainen, että ulkoseinän kosteuspitoisuus ei sisäilmasta tulevan vesihöyryn diffuusion tai konvektion vuoksi muodostu haitalliseksi. Rakenteissa olevan rakennuskosteuden ja mahdollisesti seinään ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti tunkeutuvan veden on päästävä poistumaan ja tuulettumaan niin, ettei aiheudu vahinkoa ja terveystarpeita. [RakMk C2 1998: 9.]

Seinärakenteen ollessa sellainen, että se voi läpäistä haitallisessa määrin sisäilman vesihöyryä tai ilmaa, varmistetaan seinän höyry- ja ilmatiiviyden asentamalla rakenteeseen tarkoituksenmukaisesti kohtiin höyrynsulkuna, ilmansulkuna tai tuulensuojana toimivat ainekerrokset. Avohuokaisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen on oltava vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen. Muussa tapauksessa seinärakenteeseen lisätään erillinen höyrynsulku lämmöneristyksen lämpimälle puolelle. Ilmansulun ja ilmansulkuna toimivan höyrynsulun sekä tuulensuojan saumat ja reunat tulee olla tiiviit ikkunoiden ja ovien karmien kohdalla sekä seinän ala-, väli- ja yläpohjien liittymissä. Ilmansulun lävistykset tuuletusaukkojen, sähkörasioiden, putkien jne. kohdalla on tiivistettävä huolellisesti. [RakMk C2 1998: 9.]

Toinen tärkeä tekijä rakennusten vaipparakenteiden hyvän ilmatiiviyden kannalta on asumisviihtyvyys. Kylmän ulkoilman päästessä virtaamaan sisätiloihin ilmapuotokohdistaa aiheutuu siitä vedon tunnetta ja pahimmillaan terveyshaittariskit lisääntyvät. Vaipan hyvä ilmanpitävyys parantaa sisäilman laatua, koska vedontunne vähenee ja mahdollisten homeiden, epäpuhtauksien ja haitallisten aineiden kulkeutuminen talon rakenteista, maaperästä ja ulkoilmasta sisäilmaan vähenee. [Paloniitty 2012.]

Rakennuksen paineet ja rakenteiden tiiviyden onkin suunniteltava ja toteutettava siten, että ne vähentävät epäpuhtauksien siirtymistä rakennuksessa [RakMk D2 2012: 19].

Lämpöolot vaikuttavat suoraan viihtyvyyteen. Pitkäaikainen veto ja viilleys voivat aiheuttaa terveyshaittaa. Ilman sisältämän kosteuden päästessä tiivistymään edes pistemäisesti rakennuksen kylmään pintaan kosteusvaurioiden mahdollisuus lisääntyy. [Asumisterveysohje 2003: 12.]

Ihmisen kokemaan lämpöaistimukseen vaikuttavat huoneilman lämpötila, lämpösäteily, ilman virtausnopeus ja ilmankosteus sekä vaatetus ja toiminnan laatu [Asumisterveysohje 2003: 13].

Ilman lämpötila on lämpötila, joka mitataan mistä tahansa oleskeluvyöhykkeeltä 1,1 metrin korkeudelta. Mittaus voidaan tehdä muualtakin kuin huoneen keskeltä, jos terveyshaitan arviointi sitä edellyttää. [Asumisterveysohje 2003: 14.]

Kolmas merkittävä tekijä hyvään ilmatiivyyteen pyrkimisessä on energiakulutuksen pienentäminen. Hallitsemattomalla vuotoilmalla on suuri vaikutus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Vuotoilman tarvitseman energian osuus suhteessa kasvaa siirryttäessä matalaenergiarakentamisen suuntaan.

Ilmanpitävässä rakennuksessa lämpö ei karkaa ilmavirtausten mukana ulos eikä kylmää ilmaa tule sisälle. Vuotoilma aiheuttaa noin 15...30 % lämmitysenergiantarpeesta niin sanotussa tavanomaisessa pientalossa, jonka n_{50} -luku on 4,0 1/h. Edelleen lämmitysenergian kulutus kasvaa noin 7 % jokaista ilmanvuotoluvun kokonaisuksikön muu-
tosta kohti [Vinha, Korpi 2009: 120]. Nykyisillä lämmöneristepaksuuksilla vuotoilmanvaihdon vähentäminen on merkittävimpiä ja ennen kaikkea edullisimpia keinoja jo sinällään energiataloudeltaan hyvien rakennusten parantamisessa [Aho, Korpi, ym. 2009: 7].

3.1.3 Ilmanvaihto

Nykyiset energiamääräykset ja rakennukselta vaadittavat ominaisuudet edellyttävät, että käytännössä rakennuksen ilmanvaihto on toteutettava koneellisella lämmön talteenotto-ominaisuuksilla varustetulla tulo-poisto-ilmanvaihtolaitteella. Niin sanottu painovoimainen ilmanvaihto, jonka toiminta perustuu sisä- ja ulkoilman välisiin paineroihin, toimii ”oikein päin” ainoastaan talvella.

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava kokonaisuudessaan sillä tavalla, että rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto [RakMk D2 2012: 5].

Terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto saadaan aikaiseksi käyttämällä rakenteellisia keinoja. Näitä ovat sisäisten kuormitustekijöiden pienentäminen, ulkoisten ja sisäisten kuormitustekijöiden vaikutusten rajoittaminen sekä ilmanvaihto- ja ilmastointitekniisten keinojen käyttäminen. [RakMk D2 2012: 5.]

Huonetiloissa tulee olla ilmanvaihto, jolla käyttöaikana taataan turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilman laatu [RakMk D2 2012: 5].

Rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden alipaineiseksi, näin voidaan välttyä rakenteiden kosteusvaurioilta sekä mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta. Alipaine ei kuitenkaan saa olla suurempi kuin 30 Pa. [RakMk D2 2012: 19.]

Ilmanvaihtojärjestelmän paineet suunnitellaan ja toteutetaan niin, etteivät sään vaihtelut muuta ilman virtaussuuntia rakennuksessa [RakMk D2 2012: 19].

3.1.4 Painesuhteet

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja säädettävä siten, että rakennus on ulkoilmaan nähden alipaineinen.

Rakennuksen, sen huonetilojen ja ilmanvaihtojärjestelmän paineet suunnitellaan siten, että ilma virtaa puhtaammista tiloista sellaisiin tiloihin, joissa syntyy runsaammin epäpuhtauksia. Paineet eivät saa aiheuttaa rakenteiden pitkäaikaista kosteusrasitusta. [RakMk D2 2012: 19.]

Sisäilmaston, rakenteiden sekä lämmitys- että ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan kannalta rakennuksen ilmanpitävyyden tulisi olla lähellä ilmanvuoto-luvun arvoa $n_{50} = 1$ 1/h (rakennuksen vaipan läpi virtaa yksi rakennuksen ilmatilavuus tunnissa paine-eron sisä- ja ulkoilman välillä ollessa 50 Pa). [RakMk D2. 2012.]

3.1.5 Energiatehokkuus

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että oleskeluvyöhykkeellä voidaan ylläpitää viihtyisä huonelämpötila käyttöaikana niin, ettei energiaa tarvitse käyttää tarpeettomasti [RakMk D2 2012: 5].

Rakennus on suunniteltava ja rakentaminen toteutettava siten, että tilat eivät lämpene haitallisesti. Tilojen yllälämpenemisen estäminen toteutetaan ensisijaisesti käyttämällä rakenteellisia ja muita passiivisia keinoja sekä yöllä tehostettua ilmanvaihtoa.

Rakennuksen vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviötä rajoitetaan niin, että saavutetaan hyvä energiatehokkuus [RakMk D3 2012: 12].

Rakennuksen ilmanvaihdon energiatehokkuus varmistetaan kohteen käytön kannalta tarkoituksenmukaisilla keinoilla tinkimättä terveellisestä, turvallisesta ja viihtyisästä sisäilmastosta. [RakMk D3 2012: 15.]

Rakennuksen ilmanvaihdon poistoilmasta on otettava lämpöä talteen vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpömäärästä. Vastaava lämpöenergiatarpeen pienentäminen voidaan toteuttaa myös rakennuksen vaipan lämmöneristystä parantamalla, rakennuksen vaipan ilmanpitävyyttä parantamalla tai vähentämällä ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemää lämpömäärää muulla tavoin kuin poistoilman lämmön talteenotolla. [RakMk D3 2012: 15.]

Rakennusvaipan ilmanvuotolukuna käytetään E-luvun laskennassa suunnitteluarvoa. Rakennuksen vuotoilmavirta lasketaan ilmanvuotoluvusta RakMk D3 kohdan (4.3.3) mukaisesti. [RakMk D3 2012: 21.]

$$q_{\text{vuotoilma}} = (q_{50} / 3600 * x) * A_{\text{vaippa}} \quad (1)$$

q_{50} rakennuksen ilmanvuotoluku $\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$

A_{vaippa} rakennuksen vaipan pinta-ala m^2

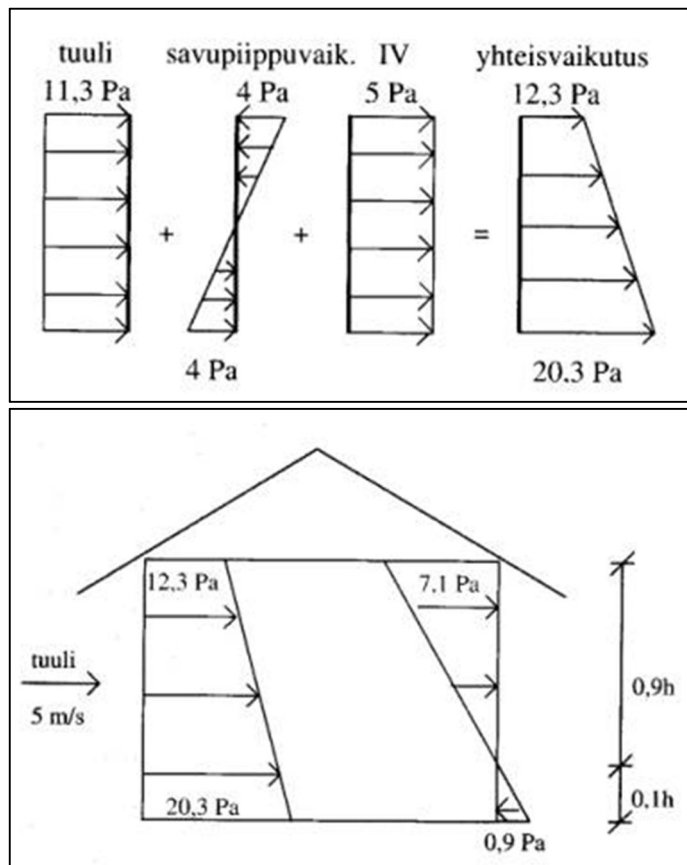
x Kerroin, joka yksikerroksisille rakennuksille on 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille 15

3600 kerroin, joka muuttaa ilmavirran m^3/h yksiköstä m^3/s yksikköön

3.2 Rakennuksen ilmanpaineet

Ilmamassa maapallon ympärillä aiheuttaa ilmakehän paineen, jonka suuruus on riippuvainen säästä ja mittauskorkeudesta. Ilmakehän paine maanpinnalla on noin 1 Bar, joka on 100 000 Pa. Ilmanpaine muodostuu kuivan ilman tiheydestä. Kuivan ilman tiheys on riippuvainen ilman lämpötilasta ja vesihöyryn osapaineesta. [Paloniitty 2012.]

Rakennuksen ja ulkoilman välisen paine-eron yksikkönä käytetään Pascalia (Pa). Luonnollisesti paine-ero rakennuksen ulko- ja sisäilman välillä vaihtelee. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat ensisijaisesti ilmanvaihtojärjestelmä, tuuli ja savupiippu- eli hormivaikutus [Kauppinen & Paloniitty. 2006: 26].

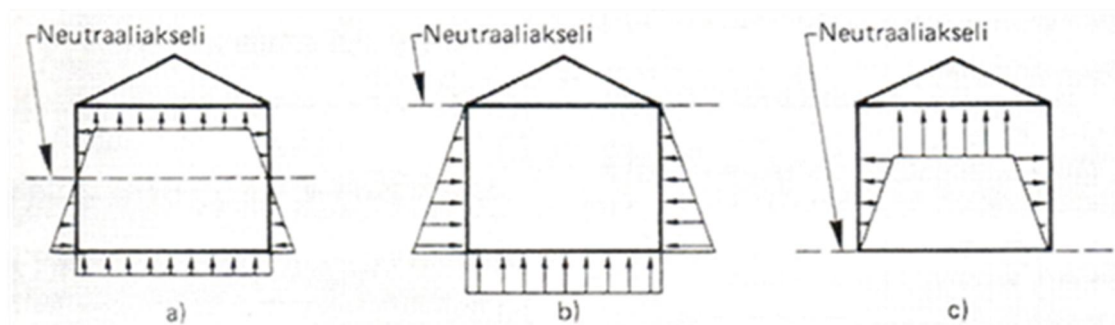


Kuva 1. Eri tekijöiden vaikutus rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon

Kylmänä vuodenaikana ulko- ja sisätilojen välisestä lämpötilaerosta aiheutuu luonnollisesti savupiippuvaikutuksesta rakennuksen yläosaan ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Savupiippuvaikutuksen aiheuttamaan paine-eroon vaikuttavat rakennuksen korkeus sekä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero. [Kauppinen, Paloniitty. 2006: 26.]

Useimmiten ylipainetta syntyy rakennuksen yläosiin jo pelkästään savupiippuilmiön vaikutuksesta, ellei sitä kumota ilmanvaihdolla. Tyypillisimpiä ylipaineikohteita ovat kattorakenteet ja ullakkotilat sekä sellaiset rakennukset, joissa ylipainetta syntyy rakennuksen korkeuden, puuttuvan poistoilmanvaihdon tai korkean lämpötilan takia. [Päloniitty 2012.]

Savupiippuilmiö syntyy huoneilman lämpötilaeroista. Lämmitessään ilman tiheys pienenee, jolloin lämmin ilma nousee ylöspäin aiheuttaen rakennuksen tai huoneen yläosiin ylipainetta. Lämpimän ilman virratessa ylöspäin, virtaa rakennukseen kylmää ilmaa rakennuksen alaosissa olevista ilmavuotokohdista.



Kuva 2. Neutraaliakselin sijainti, kun a) vaipan tiivys on tasaisesti jakautunut, b) epätiiviydet rakennuksen yläosassa, c) epätiiviydet rakennuksen alaosassa. [Björkholtz 1997]

Savupiippuilmiön aiheuttama paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on riippuvainen rakennuksen muodosta ja sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta. Mitä korkeampi rakennus ja mitä suuremmat ulko- ja sisäpuolen väliset lämpötilaerot sitä voimakkaampi on savupiippuilmiö.

Savupiippuilmiön aiheuttamien paine-erojen suuruus on laskettavissa kaavasta 2 [Björkholtz 1997: 77.]

$$\Delta p = 0,043 \cdot \Delta t \cdot h \quad (2)$$

missä $\Delta t = t_s - t_u$ (°C)

h = etäisyys neutraaliakselista

Tuulella on merkittävä vaikutus rakennuksen paine-eroihin. Tuulen vaikutuksesta aiheutuva rakennuksen sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero riippuu tuulen voimakkuu-

desta, suunnasta, rakennuksen muodosta ja sijainnista. Rakennuksen korkeus ja suo-
jaisuus ovat tekijöitä, jotka joko korostavat tai alentavat tuulen vaikutusta paine-eroihin.
Rakennuksiin vaikuttavan tuulipaine kentän määrittäminen tarkasti on vaikeaa. Tuulen
aiheuttamaa painetta voidaan kuitenkin yleisesti arvioida Bernoullin yhtälöllä [Paloniitty
2012]:

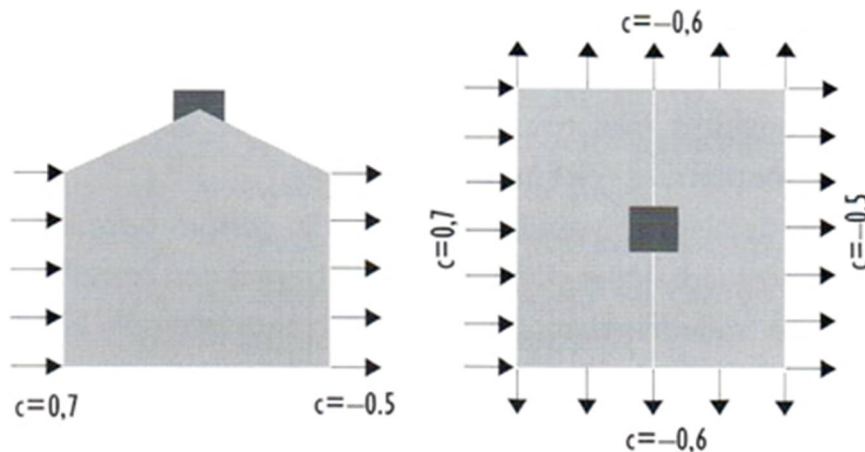
$$p = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \quad (3)$$

missä

c = rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuva vakio

ρ = ulkoilman tiheys kg/m^3

v = tuulen nopeus m/s



Kuva 3. Pelkistetyn rakenteen muotokertoimet c . [Paloniitty 2012.]

Tuulenpuoleiseen seinään kohdistuu yleisesti ylipaine ja niin kutsuttuun suojanpuolei-
seen seinään alipaine. Tuulen vaikutuksesta kattoihin kohdistuvan paineen suuruuteen
vaikuttavat katon koko, katon muoto, katon kaltevuus ja tuulen pyörteisyys.

Ilmanvaihtojärjestelmällä on erittäin suuri merkitys rakennuksen painesuhteisiin. Paino-
voimainen ilmanvaihtojärjestelmä perustuu hormivaikutukseen ja tuulen aiheuttamaan
ejektorivaikutukseen. Painovoimaisessa rakennuksessa on siis aina nollataso, jonka
yläpuolella on ylipaine ja alapuolella alipaine ulkoilmaan verrattuna. Nollatason yläpuo-
lella sisäilma pyrkii tunkeutumaan rakenteen läpi ulos. Nollatason alapuolella ulkoilma
pyrkii tunkeutumaan mahdollisia ilmanvuotokohtia hyväksi käyttäen sisään. [Kauppi-
nen, Paloniitty. 2006: 27.]

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä poistoilma johdetaan koneellisesti poistoilmaventtiilien ja poistokanavien kautta ulos. Raitis ilma otetaan suoraan ulkoilmasta ulkoilmaventtiilien kautta. Koko rakennus on alipaineinen ulkoilmaan nähden. [Kauppinen, Paloniitty. 2006: 27.]

Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä sekä tulo- että poistoilma vaihdetaan koneellisesti. Järjestelmä voi olla varustettu lämmöntalteenotolla. Ilmanvaihto säädetään siten, että rakennus on lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden. Korkeissa tiloissa saattaa rakennuksen yläosa olla silti ylipaineinen. Tyypillisiä esimerkkejä tästä ovat uimahallien hyppytomiosat ja korkeat teollisuusrakennukset. [Kauppinen, Paloniitty. 2006: 27.]

Jos rakennuksessa on käytössä koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä, tilat pyritään tasapainottamaan siten, että alipaine ulkoilmaan verrattuna on < 10 Pa. Rakennusten alipaineisuus ulkoilmaan nähden on tärkeää siitä syystä, että ilmapirta kulkee ulkoa sisäänpäin mahdollisten ilmapuotokehtien kautta. Rakennuksen ollessa ylipaineinen, aiheuttaa se suuren riskin rakenteiden toiminnalle, lämpimän ilman sisältämän suuren vesihöyrymäärän tiivistyessä ulos virratessaan rakenteen sisällä kylmiin pintoihin.

3.3 Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät

Koska rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon vaikutetaan merkittävästi ilmanvaihtojärjestelmällä, on erittäin oleellista, miten rakennuksen ilmanvaihto toteutetaan. Rakennukset jaetaan kolmeen eri luokkaan ilmanvaihdon kannalta. Jako tapahtuu sen perusteella, miten rakennukseen tuotetaan raitista ilmaa ja millä tavalla jäteilma poistetaan.

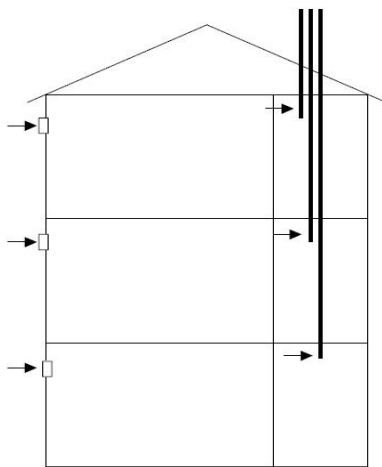
Painovoimainen ilmanvaihto

Painovoimaisella ilmanvaihtojärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jonka toiminta perustuu korkeus- ja lämpötilaerojen sekä tuulen aiheuttamiin paine-eroihin. Lämmin sisäilma kevyempänä virtaa poistoilmakanavassa ylöspäin ja ulos rakennuksesta. Tilalle tulee ulkoilmaa sekä ulkoilmalaitteiden kautta että rakenteiden ilmapuotoina. [RakMk D2. 2012: 4.] Tätä kutsutaan myös hormi- eli savupiippuvaikutukseksi sekä tuulen ejettorivaikutukseksi.

Rakennuksessa, jossa on painovoimainen ilmanvaihto, on siten aina nollataso, jonka yläpuolella rakennus on ulkoilmaan verrattuna ylipaineinen ja alapuolella alipaineinen. Nollatason yläpuolella sisäilma pyrkii tunkeutumaan rakenteen läpi ulospäin ja nollatason alapuolella ulkoilma pyrkii tunkeutumaan ilmanvuotokohtia pitkin sisäänpäin. [Kauppinen & Paloniitty. 2006: 27.]

Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän jäteilmalaitte pyritään sijoittamaan yleensä rakennuksen harjaviivan yläpuolelle. Tarvittaessa poistoa tehostetaan käyttämällä tuuliohjaimia, -roottoreita tai muita vastaavia laitteita. [RakMk D2. 2012: 12.]

Painovoimaisen ilmanvaihdon ongelma on se, että se toimii vain talvella. Kesäolosuhteissa painovoimainen ilmanvaihto saadaan vaihtamaan ilmaa lämmittämällä mahdollisia tulisijoja. Tämä on kuitenkin harvemmin kesäisin tarpeellista. Painovoimaisen ilmanvaihdon energiatehokkuus on erittäin huono. Talvella korvausilmakanavien kautta otettava kylmä ulkoilmanlämpöinen ilma on lämmitettävä ja tämä lämmitetty ilma johdetaan sitten poistoilmahormiston kautta suoraan ulos.



Kuva 4. Painovoimaisen ilmanvaihdon periaatteellinen toiminta [Immonen 2008]

Toiminta perustuu sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_s - T_u}{T_u} \quad (4)$$

jossa; ρ = ilman tiheys 1,2 kg/m³

g = 9,81 m/s²

h = poistohormin korkeus

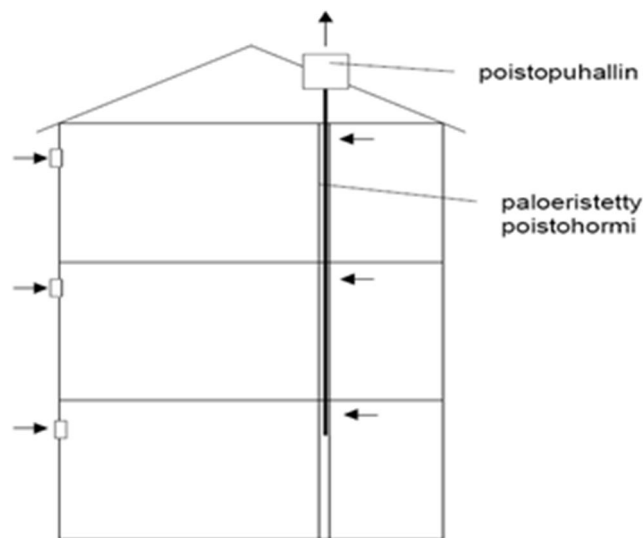
T_s = sisälämpötila K

T_u = ulkolämpötila K

Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaedellytyksinä ovat riittävän korkeat poistohormit, riittävä lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä, riittävän väljät korvausilmaventtiilit, yhden poistoilmahormin päässä voi olla ainoastaan yksi huone, poistohormit ovat riittävän väljästi mitoitetut, kunnossa ja tiiviit sekä virtausvastukseltaan pienet poistoilmaventtiilit. [Pekkonen 2007].

Koneellinen poisto

Koneellisella poistoilmajärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jossa ilma poistetaan rakennuksesta koneellisesti puhaltimen avulla ja tilalle tulee ulkoilmaa sekä ulkoilmalaitteiden kautta että rakenteiden ilmavuotoina. Rakennus on yleensä kauttaaltaan alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tämä järjestelmä on energiatehokkuuden kannalta ongelmallinen siinä suhteessa, että korvausilma tulee yleensä lämmittämättömänä suoraan ulkoa ulkoilman lämpöisenä. Poistoilman lämpöä voidaan nykyisin jo hyödyntää, mutta on vielä harvinaista ja menee usein hukkaan suoraan ulkoilmaan.

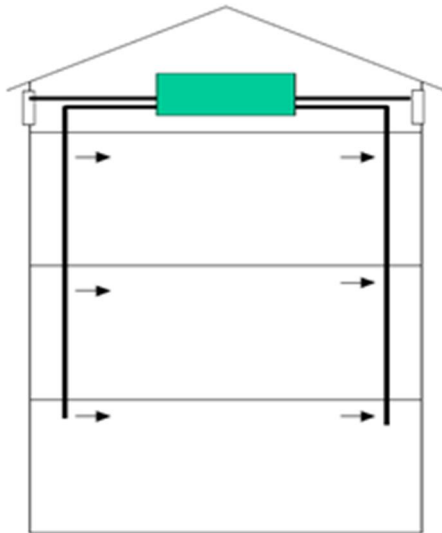


Kuva 5. Koneellisen poisto-ilmanvaihtojärjestelmän periaatekuva [Immonen 2008].

Toimiakseen hyvin, koneelliselta poisto-ilmanvaihtojärjestelmältä edellytetään, että poistopuhallin on käynnissä myös yöllä, korvausilmareitit ovat kunnossa (muu kuin postiluukku), korkeapainehäviöiset palonrajoittimina toimivat poistoventtiilit eikä rakennuksessa ole omalla puhaltimella varustettuja liesituulettimia [Pekkonen 2007].

Koneellinen tulo-poisto

Koneellisella tulo- ja poistoilmajärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jolla ilma poistetaan rakennuksesta koneellisesti puhaltimen avulla ja tilalle tuodaan lämmitettyä/ jäähdytettyä ja suodatettua ulkoilmaa puhaltimen avulla. Rakennuksen tulisi olla lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden.



Kuva 6. Koneellisen tulo-poisto ilmanvaihtojärjestelmän periaatekuva [Immonen 2008]

Tämä ilmanvaihtojärjestelmä edellyttää, että tuloilma on suodatettava. Tulo- ja poistoilmavirrat säädetään siten, että poisto on vähän suurempi, jotta rakennus saadaan hieman alipaineiseksi ulkoilmaan nähden. Tällä torjutaan rakenteiden kosteusvaurioita ja mikrobien aiheuttamia terveyshaittoja. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto mahdollistaa lämmöntalteenoton rakentamisen. [Pekkonen. 2007.]

3.4 Rakennuksen fysiikka; lämpöfysiikka

Lämpö siirtyy rakenteissa tai tilassa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion eli ilmavirtauksen mukana [Siikanen. 1996: 37].

Johtumisessa molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa eli virtaamaan lämpimästä kylmään päin. Lämmön johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa ja nesteissä. [Siikanen. 1996: 37.]

Säteilyssä jokaisen kappaleen kaikki pinnat, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen ($-273,15\text{ °C}$) yläpuolella, lähettävät eli emittoivat lämpösäteilyä ympäristöönsä. Säteilyn voimakkuus riippuu pintalämpötilasta ja pinnan emissiokertoimesta eli kyvystä lähettää lämpösäteilyä. Pinnan kyky säteillä ja heijastaa lämpöä tulee erottaa toisistaan, sillä heijastuminen tarkoittaa tutkittavan kappaleen pinnasta heijastuvaa ympäristön lämpösäteilyä. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä. Lämpösäteily poikkeaa muista siirtymistavoista siinä, että se sähkömagneettisena säteilynä ei tarvitse väliainetta energian siirtämiseen. [Siikanen. 1996: 37.]

Konvektiossa eli virtauksessa lämpö siirtyy nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero saa aikaan liikkeen. Täysin luonnollista konvektiota esiintyy harvoin. [Siikanen. 1996: 38.]

3.5 Rakennuksen fysiikka; kosteus

Meitä ympäröivä ilma ja kaikki huokoiset materiaalit ja rakenteet sisältävät normaalioloissa jonkin verran kosteutta. Kosteuden määrä riippuu materiaalin ominaisuuksista ja ympäröivän ilman lämpötilasta sekä ilman kosteudesta. Rakenteisiin voi joutua ylimääräistä kosteutta myös rakentamisen aikana ja käytön yhteydessä. [Siikanen. 1996: 51.]

3.5.1 Vesihöyrykosteuden siirtyminen rakenteisiin

Sisäilmassa oleva kosteus muodostuu ulkoilman kosteudesta ja sisäilman kosteusli-
sästä. Rakennuksen käyttöön ja asumiseen liittyvät eri toiminnot tuottavat sisäilmaan
lisäkosteutta, josta syntyy vesihöyrypitoisuusero sisä- ja ulkoilman välille [RIL 107-
2012: 23]. Asuinrakennuksissa kosteuslisä voi olla talvikuukausina jopa $4\text{-}5\text{ g/m}^3$.

Huone- tai ulkoilman sisältämä kosteus kulkeutuu rakenteisiin joko vesihöyryn osapai-
ne-eron aikaansaaman diffuusion muodossa, jonka suunta on suuremmasta vesi-
höyryn osapaineesta pienempään tai rakenteen eri puolilla vallitsevan ilmanpaine-eron
aiheuttaman ilmavirtauksen eli konvektion kuljettamana. [Siikanen. 1996: 55.]

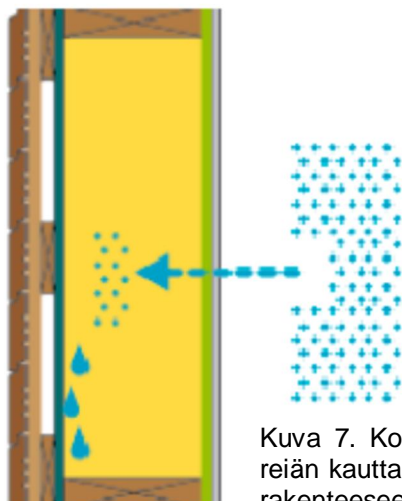
Lämpimän sisäilman kulkeutuminen ulos paine-eron vaikutuksesta aiheuttaa sisäilman
kosteuden kondensoitumisriskin rakenteiden kylmiin ulko-osiin ja siten voi aiheuttaa
kosteus- ja homevaurioita. [Paloniitty 2012.]

3.5.2 Konvektio

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen
mukana. Ilman virtaukset johtuvat ilmanpaine-eroista. Ilma virtaa aina alenevan koko-
naispaineen suuntaan. [Siikanen. 1996: 56.]

Kosteutta mukanaan kuljettavaa konvektiovirtausta saattaa esiintyä seinän sisäisenä
eli ilman tiheyseroista johtuvana ns. luonnollisena konvektiona tai rakenteessa olevien
rakojen ja reikien kautta tapahtuvana ilmanpaine-erojen vaikutuksesta pakotettuna
konvektiona. [Siikanen. 1996: 56.]

Talvi



Kuva 7. Kosteus kulkeutuu höyrinsulussa olevan
reiän kautta konvektion eli virtauksen avulla seinä-
rakenteeseen. [Tiivistalo 2013]

Rakenteiden toiminnan kannalta suurin merkitys kylmänä vuodenaikana on reikien, rakojen, halkeamien yms. läpi sisältä ulos ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvilla ilmavirtauksilla. Nämä virtaukset voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisia kosteusmääriä diffuusioon verrattuna. [Siikanen. 1996: 56.]

Konvektio yleisesti on lämmön siirtoa kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Se aiheutuu lämpötilaerosta, joka aiheuttaa tiheyseroja. Kuuma, harva aine kohoaa painovoimakentässä ylöspäin. Liikkeellepaneva voima on siis noste. Harva, viilentynyt aine laskeutuu alaspäin. Konvektio on johtumisen ja säteilyn ohella yksi kolmesta primäärisestä lämmönsiirtotavasta. Hellalla lämmitettävässä vesikattilassa voi havaita konvektiota ennen kiehumista, ja varsinkin tätä huomaa silloin, kun kuumentaa vettä lasiastiassa, sillä eri tiheyksisellä vedellä on erilainen taitekerroin, mikä saa aikaan näkyvää veden väreilyä. [Wikipedia. 2013.]

Rakenteiden ilmapuotokohtien kautta kulkeutuva ilma kuljettaa mukanaan myös ilman sisältämän vesihöyryn. Tätä ilmiötä kutsutaan kosteuden konvektioksi. Kosteuden konvektio johtuu aina ilmavirrasta Q , joka ottaa mukaansa vesihöyryä, jota ilma sisältää kaasumaisena seoksena.

Kosteusvirta voidaan laskea kaavasta:

$$g = v \times Q \quad (5)$$

missä g = kosteusvirta, g/s

v = vesihöyrypitoisuus ilmassa, g/m³

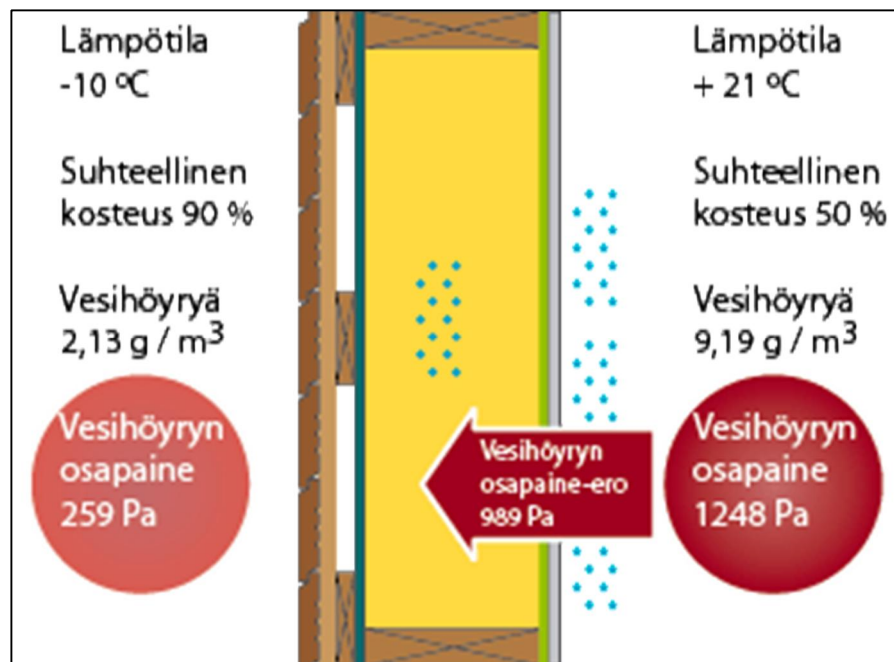
Q = ilmavirta, m³/s

Rakennuksen ollessa alipaineinen, eli ulkoilma virtaa sisälle päin, ei kuiva ulkoilma (ulkoilma on yleensä kuivempaa kuin sisäilma) aiheuta kosteuden tiivistymistä. Mutta kun rakennuksessa on ylipaine, voi sisäilman kosteus kulkeutua rakenteisiin ja aiheuttaa kosteusvaurion. [Paloniitty 2012.]

3.5.3 Diffuusio

Ilma ei liiku, vaan kosteuserot pyrkivät tasoittumaan. Diffuusio on ilmiö, jossa molekyylit pyrkivät siirtymään väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan tasoittaen mahdolliset pitoisuuserot ajan mittaan. Molekyylit liikkuvat satunnaisen lämpöliikkeen eli Brownin liikkeen mukaan.

Vesihöyryn diffuusio on lähinnä rakennustekniikassa käytettävä termi, joka tarkoittaa yleensä kosteuden eli höyrymolekyylien satunnaista liikkumista ilmassa tai huokoisen aineen huokosissa. Diffuusio pyrkii tasoittamaan vesihöyryn osapaineen tai vesihöyrypitoisuuden paikallisia eroja höyryn siirtyessä pienempään pitoisuuteen/ osapaineeseen päin. Lähes kaikki materiaalit läpäisevät tietyn määrän vesihöyryä.



Kuva 8. Kosteuden kulkeutuminen rakenteeseen diffuusion avulla [Tiivistalo 2013].

Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä kylmään päin. Huomattavin diffuusion suuntaan vaikuttava tekijä on tilojen välillä vallitseva ilman kosteusero. Kosteus pyrkii diffuntoitumaan erottavan rakenteen läpi tilaan, jonka ilman vesihöyryn osapaine ja yleensä myös absoluuttinen kosteus on pienempi. Jos kylmemmän tilan kosteuspitoisuus on suurempi kuin lämpimämmän tilan, voi diffuusion suunta olla myös kylmästä lämpimään päin. [Siikanen. 1996: 56.]

Vesihöyryn kulkeutuessa huokoisten materiaalien läpi on harvoin kyse puhtaasta diffuusiosta. Materiaalin sisällä osa kosteuden liikettä saattaa olla kapillaarista. Jotta es-tettäisiin vesihöyryn liiallinen kulkeutuminen rakenteisiin ja samalla mahdolliset koste-usvauriot, tulee vaipparakenne suunnitella siten, että lämmöneristeen ja lämpimän tilan väliin tulee riittävän vesihöyryntiivis kerros ja rakenteen vesihöyrynvastus pienenee kylmään tilaan päin mentäessä. [Siikanen. 1996: 56.]

3.5.4 Kondensoituminen

Kondensoituminen on ilmiö, jossa ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy vedeksi. Tiivistyminen voi tapahtua joko rakenteen pinnassa tai sen sisällä, ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. [Siikanen. 1996: 57.]

Rakenteissa vesihöyry tiivistyy aina kovalle pinnalle, joka on kylmempää kuin ympäröivä ilma, jos vesihöyryn kyllästymiskosteus eli kastepiste ylittyy. Tavallisimmin tiivistyvää kosteutta aiheuttavat liian kylmä lämpimään tilaan rajoittuva rakenteen sisäpinta esimerkiksi ikkunalasi, kylmäsillat, höyrysulun puutteellinen tai väärä sijainti ja rakenteen höyrysulussa olevat reiät, jotka mahdollistavat konvektiovirtauksen sisältä ulos. [Siikanen. 1996: 57.]



Kuva 9. Sisäilman sisältämä vesihöyry on tiivistynyt (kondensoitunut) kylmään raitisilmaventtiilin kanteen ja venttiilin riittävän alhaisesta lämpötilasta johtuen jäätynyt.

Diffuusion haittavaikutusten estämiseksi tulee rakenteet tehdä lämpimältä puolelta riittävän vesihöyryntiiviiksi ja samalla ne tulee suunnitella siten, että rakenteen vesihöyrynvastus pienenee lämpimästä kylmään päin mentäessä. Rakenteen lämpimällä puolella käytetään yleensä diffuusiotiivistä kerrosta eli höyry- tai ilmansulkua. Tiivis kerros estää samalla rakenteen läpi tapahtuvat ilmavuodot ja mahdolliset konvektiokosteudesta aiheutuvat kondenssivauriot. Huonetilassa vallitseva alipaine vähentää rakenteisiin kohdistuvaa vesihöyrynpainetta ja siten kondensoitumisvaaraa. [Siikanen. 1996: 57.]

3.5.5 Vesihöyrynläpäisevyys $\text{kg m} / \text{m}^2\text{sPa}$

Vesihöyrynläpäisevyys kuvaa aineen ominaisuutta päästää läpi vesihöyryä. Diffuusiolaskelmissa oletetaan vesihöyrynläpäisevyys vakioksi. Tosiasiassa vesihöyrynläpäisevyys muuttuu aineen kosteuden muuttuessa. Vesihöyrynläpäisevyys on tietyn paksuisen ainekerroksen ominaisuus. [Siikanen. 1996: 57].

3.5.6 Vesihöyrynvastus $\text{m}^2\text{sPa} / \text{kg}$

Vesihöyryn vastus kuvaa aineen vesihöyryn virtausta vastustavaa ominaisuutta. Se on käänteinen suure vesihöyryn läpäisylle. [Siikanen. 1996: 57.]

Määritettäessä diffuusiokosteuden liikkumista ja mahdollista tiivistymistä rakenteissa, täytyy tuntea rakenteiden eri osien lämpötilat, eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset, lämpötiloja vastaavat kyllästymispaineet ja suhteellinen kosteus rakenteen molemmilla puolilla. [Siikanen. 1996: 57.]

Seinän kosteusteknisessä tarkastelussa oletetaan vesihöyryn osapaineen muuttuvan samassa suhteessa kuin rakenteessa olevien ainekerrosten vesihöyrynvastukset [Siikanen 1996: 57].

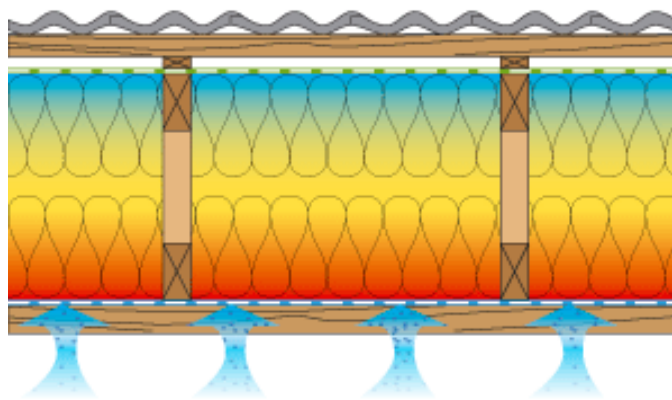
3.6 Rakenteiden ilmatiiviys

Käsitteellä ilmatiiviys tarkoitetaan asiayhteydestä riippuen rakenteen vesi-, ilma- ja vesihöyrytiiveyttä. Rakenteen tiiviys sekoitetaan usein rakenteen hengittävyys tai epähengittävyys. ”Hengittävyydellä” ei kuitenkaan tarkoiteta rakenteen ilmatiiviyttä vaan vesihöyryn diffuusiota eli vesihöyryn kulkeutumista molekyylitasolla rakenteen läpi. Ilmatiiviys taas tarkoittaa rakenteen kykyä vastustaa ilman virtaamista eli ilman kulkeutumista konvektion avulla rakenteen läpi.

Ilman virtausta eli konvektiota aiheuttavat rakennuksen sisä- ja ulkopuolen väliset paine- ja lämpötilaerot. Luonnollisessa konvektiossa ilma virtaa lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vuoksi. Pakotetussa konvektiossa ilma liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman tuottaman paine-eron vaikutuksesta. Tällaista ilman liikettä aiheuttavat esimerkiksi savupiippuvaikutus, tuuli ja ilmanvaihtojärjestelmät. [Paloniitty 2012.]

Rakennuksen vaipan ilmansulku voidaan toteuttaa rakennusmateriaaleilla kuten betonilla, puumateriaaleilla kuten hirsi, rakennuslevyillä tai erillisellä ilmansulkukerroksella.

TIIVIS RAKENNE TALVELLA



Kuva 10. Rakenteessa oleva tiivis höyrynsulkukerros estää sisäilman vesihöyryn kulkeutumisen rakenteeseen. [Tiivistalo 2013]

Erillistä ilmansulkukerrosta käytettäessä yleisimpiä materiaaleja ovat rakennuspaperit, tervapahvit ja muovit sekä nykyisin myös muovieristeet. Muovia käytettäessä saadaan ilmansulun lisäksi aikaan myös höyrynsulkukerros, joka estää sisäilmassa olevan vesihöyryn siirtymisen rakenteisiin sekä konvektion eli virtauksen että diffuusion vaikutuk-

sesta. Käytettäessä ilmansulkukerros paperipohjaisia materiaaleja näillä voidaan estää ainoastaan konvektiovaikutus. Tämä tiivis rakennekerros asennetaan lähelle vaipan sisäpintaa ja sen tarkoituksena on estää kosteuden pääsy rakenteeseen konvektiolla tai diffuusiolla. Tämän kerroksen tarkoituksena on myös hidastaa ilmavirtauksia vaipan läpi, jotka saattaisivat aiheuttaa vetoisuutta. Vaipan ulkopinnan tiiviydellä pyritään estämään tuulen ja ilmavirtausten vapaa pääsy ulkopuolelta lämmöneristekerrokseen. Oleellista kokonaisvaltaisen tiiviyden aikaansaamiseksi on saada erityisesti rakenteiden liittymät ja epäjatkuvuuskohdat tiiviiksi.

Ilmantiiviyden kannalta rakennukset voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääryhmään; rakenteet, joissa ei ole erillistä ilmansulkukerrosta, rakenteet, joissa on tiivis höyrynsulkukerros ja rakenteet, joissa on ”hengittävä” ilmansulkukerros.

Varsinaista erillistä ilman- tai höyrynsulkukalvoa ei käytetä massiivihirsi-, täystiili- eikä betonirakenteisissa rakennuksissa. Myöskään vanhoissa purueristeisissä rungoltaan rankarakenteisissa rakennuksissa ei ole välttämättä käytetty erillistä ilmansulkukerrosta.

Suuremmat vaipan epätiiviydskohdat on helppo paikallistaa ja korjata. Usein kuitenkin unohdetaan pienempien reikien ja repeämien vaikutus niiden ”mitättömyyden” takia.

Seuraavilla laskentakaavoilla voidaan tarkastella, kuinka paljon ilmaa voi kulkeutua erilaisten vaipan epätiiviydskohtien läpi. Laskennassa tarvitaan aukon tai reiän pinta-ala, paine-ero sekä aikayksikkö. Ilmamäärien laskentatapaan vaikuttavat reiän koko, reiän muoto sekä rakenteen paksuus.

Ilmavirtausta pienempien reikien kautta ohuessa rakenteessa voidaan mitoitaa seuraavalla yhtälöllä [Björkholtz 1997] aikayksikkönä on sekunti:

$$Q = 0,8 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6)$$

missä A = reiän pinta-ala m^2

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

Edellä esitetty kaava soveltuu esimerkiksi höyrynsulun tai vastaavan ohuen ainekerroksen pienten reikien kautta tapahtuvan pyörteellisten / turbulenttien ilmavuotojen ilmamäärän laskentaan.

Paksussa rakenteessa ja suuremmissa, laminaarista / pyörteetöntä virtausta vastaanottavissa rei'issä kulkeutuva ilmamäärä voidaan laskea kaavasta [Björkholtz 1997]:

$$Q = A \cdot (b^2 / (12 \cdot \eta)) \cdot (\Delta p / l) \text{ m}^3/\text{s} \quad (7)$$

missä

$$A = b \cdot d = \text{aukon koko m}^2$$

$$\eta = \text{ilman viskositeetti N} \cdot \text{s/m}^2, (\eta_{\text{ilma}} = (17,1 + 0,0049 \cdot t) \cdot 10^{-6})$$

t = ilman lämpötila

l = rakenteen paksuus / raon syvyys m

Paksussa rakenteessa pyöreille suuremmissa, laminaarista / pyörteetöntä virtausta vastaanottavissa rei'issä kulkeutuva ilmamäärä voidaan laskea kaavasta [Björkholtz 1997]:

$$Q = A \cdot (b^2 / (32 \cdot \eta)) \cdot (\Delta p / l) \text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

missä

$$A = (\eta \cdot d^2) / 4 = \text{aukon koko m}^2$$

3.6.1 Ilmanvuotoluku

Ilmansulun toimivuutta rakenteessa eli rakenteen tiiviyttä voidaan mitata koejärjestelyin, jolloin tulokseksi saadaan ilmanvuotoluku. Ilmanvuotoluku kuvaa sitä ilmamäärää, joka vuotaa vaipan rakenteiden läpi yhden tunnin aikana sisä- ja ulkotilojen välisen paine-eron ollessa 50 Pa. Yleensä tiiviys mitataan aiheuttamalla rakennuksen sisälle alipaine.

Alipaine saadaan aikaan puhaltimella, joka asennetaan ulko-oveen tai ikkunaan. "Vuotokäyrä ajetaan 5-10 Pa:n välein 0- 55 Pa:n välillä. Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan." [Kauppinen, Paloniitty. 2006: 58].

Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella. Näin saatu ilmanvuotoluvun arvo n_{50} 1/h, vaihtoa tunnissa, joka kuvaa ulkovaipan tiiviyttä. [Asumisterveysohje 2003: 16.]

Rakennusvaipan alhainen ilmanvuotoluku ei vielä välttämättä takaa vaipparakenteiden moitteetonta toimintaa ilmatiivyyden osalta, koska vaipassa voi silti esiintyä paikallisesti merkittäviäkin ilmanvuotokohtia. Siksi ilmansulun kaikkien liitosten ja reikien huolellinen tiivistäminen on tärkeitä. [Tasauslaskentaopas 2012: 25.]

3.6.2 Ilmansulkumateriaalina muovi- tai bitumikalvo

Yleisimmin käytettyjä kalvomaisia höyrynsulkumateriaaleja ovat muovi ja bitumi. Muovisina höyrynsulkuina käytetään STF-hyväksytyjä 0,2 mm vahvuisia polyeteenimuovikalvoja, verkkovahvisteisia muovikalvoja ja alumiinilaminoituja muovikalvoja. Höyrynsulkumuovi on UV-suojattu ja väriltään sinertävä. Bitumisina höyrynsulkuina käytetään usein bitumikermejä, joita käytetään myös vedeneristyksen alusmateriaaleina. On myös erityisesti höyrynsulkutarkoitukseen valmistettuja bitumisia höyrynsulkukalvoja. [Toimivat katot 2013: 18.]

Rakenne, jossa käytetään lämmöneristeenä mineraalivillaa, tarvitsee aina höyrynsulkukerroksen. Mineraalivilla ei kykene sitomaan huokosrakenteeseensa kosteutta. Muovikalvo ja bitumi toimivat sekä ilman- että höyrynsulkuna eli estävät ilman virtauksen ja näin myös vesihöyryn konvektion. Muovi ja bitumi estävät myös haitallisen vesihöyryn pääsyn diffuusion avulla rakenteeseen.

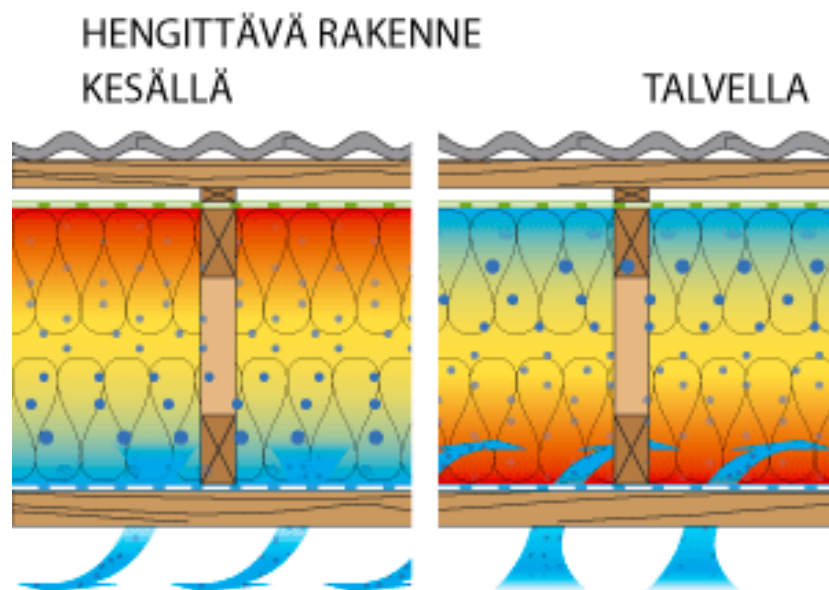
Höyrynsulkumateriaalit valitaan rakennuksen kosteusrasituksen, kattorakenteen tyyppin ja tuuletuksen perusteella. Höyrynsulun on oltava sitä kestävämpi, mitä suurempi on kosteusrasitus ja mitä huonompi on rakenteen tuuletus. Höyrynsulkumateriaalit on jaettu käyttöluokituksiin sisäilman kosteuslisän mukaan. Käyttöluokituksessa löytyvät vaatimukset bitumisille ja muovisille höyrynsulkukalvoille. [RIL 107-2012: 23-24.]

3.6.3 Ilmansulkupaperi

Rakenteissa, joissa käytetään lämmöneristeenä puukuitueristettä esimerkiksi eko-villa tai selluvilla, jotka käytännössä ovat silputtua paperia, voidaan käyttää muovin sijasta ilmansulkupaperia. Ilmansulkupaperi estää ilmavirtauksen rakenteeseen. Paperin läpi pääsee kuitenkin diffuusion avulla eristekerrokseen ilmassa olevaa vesihöyryä. Hygrooppisuutensa ansiosta puukuitueriste pystyy sitomaan huokosrakenteeseensa il-

man kosteutta ja luovuttamaan sitä myöhemmin pois. Vaikka käytettäisiin ilmansulku-paperia, tulee rakennus rakentaa niin, että saadaan aikaan ilmatiivis rakenne.

Hygroskooppisuus tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä ja luovuttaa tätä sitoutunutta kosteutta takaisin ilmaan, kun ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Aineiden hygroskooppisuutta kuvataan tasapainokosteus- eli sorptiokäyrillä. Käyrä ilmoittaa, kuinka paljon hygroskooppisesti sitoutunutta kosteutta aine voi sisältää tasapainotilassa eri suhteellisissa kosteuksissa.



Kuva 11. Rakenteessa on käytetty ns. "hengittävää" ilmansulkukerrosta. [Tiivistalo 2013]

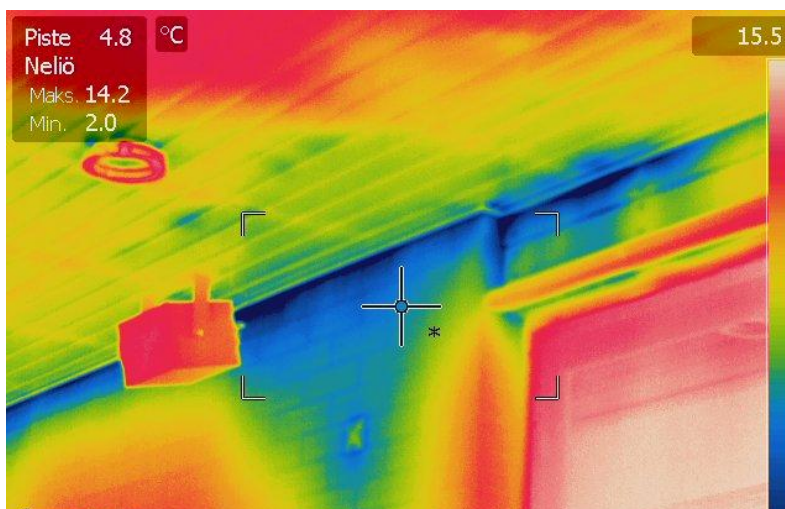
Puu ja puupohjaiset rakennusaineet, kuten esimerkiksi lastulevy, puukuitulevy ja puukuitueriste ovat hygroskooppisia.

3.6.4 Rakenteiden ongelmakohtia

Rakenteet, joissa ei käytetä ilman- eikä höyrinsulkua mahdollistavat sen, että sisäilmassa oleva vesihöyry pääsee kulkeutumaan rakenteeseen ja kohdatessaan kastepistemälämpötilan tiivistyy vedeksi. Tästä ei ole haittaa, jos materiaalin huokosrakenne on sellainen, että se kykenee sitomaan vesihöyryä itseensä, kuten hirsirakenne, ja myöhemmin taas luovuttamaan sitä takaisin ympäristöönsä.

Betoni materiaalina kykenee sitomaan vettä ja luovuttamaan sitä myöhemmin pois. Ongelmia syntyy silloin, kun sisältä tuleva vesihöyry tiivistyy vedeksi ja jäätyy. Pakkasrapautumista on havaittu lämmöneristeen ja ulomman betonikerroksen liittymäkohdassa, jossa vesi pääsee jäätymään.

Rakenteissa, joissa käytetään höyrynsulkumuovia, ei haitallista kosteutta pääse kulkemaan rakenteen sisään. Ongelmat syntyvät silloin, jos muovissa on vuotokohtia. Tiivistämisen kannalta ongelmallisia paikkoja ovat kaikki höyrynsulun lävistävät rakenteet ja rakennusosat kuten savupiiput, ilmanvaihtokanavat, vesi- ja viemäriputket sekä sähköputket ja -asiat. Alasidepuun ja sokkelin välinen liitoskohta on myös osoittautunut erittäin hankalaksi paikaksi ilmatiiviiden kannalta. Rakennuksen ulkoseinien ollessa esimerkiksi betonia, kevytbetonia, täystiilliseiniä tai muuta kiviainesta, joissa ei käytetä erillistä höyrynsulkua, on osoittautunut erittäin vaikeaksi saada puurakenteisen yläpohjan höyrynsulkumuovi liittymään ilmatiiviisti kiviseiniin. Ongelmallisia ovat myös ulkoseinien ja välipohjien liitokset, joissa ulkoseinän höyrynsulku on usein vaikea saada kulkemaan ehjänä liitoskohdan yli. Tämä ongelma on merkittävä ns. 1 ½ krs -pientaloissa, joissa ylemmän kerroksen runko tehdään kehäristikkoja käyttäen.



Kuva 12. Lämpökuva puurakenteisen yläpohjan ja tiiliseinän liitoksesta, jossa näkyy sinisellä värillä selvä ilmavuoto.

Höyrynsulkumuovien liitoksiin on kehitetty hyviä materiaaleja, jotka tiivistävät liitokset hyvin ja ovat pitkäikäisiä. Muovien saumojen teippauksessa käytetään kaksipuolista höyrynsulkuteippiä. Lisäksi saumat tulisi aina tehdä puristusliitoksena. Erilaisten putkien ja

hormien läpivientiin on ns. läpivientikauluksia ja läpivientikappaleita, jotka liittyvät tiiviisti sekä höyrynsulkumuoviin että muovin lävistävään materiaaliin.



Kuva 13. Höyryn- ja ilmansulkukalvojen läpivientikauluksia.

Ilmansulkupaperi estää kyllä haitallisen ilmavirtauksen rakenteeseen, mutta vesihöyry pääsee paperista diffuusion avulla läpi. Paperia voidaan käyttää vain sellaisten materiaalien kanssa, jotka kykenevät sitomaan vettä huokosrakenteeseensa ja myöhemmin luovuttamaan sitä. Paperi on myös asennettava niin tiiviisti, ettei siihen jää ilmavuoto-kohtia. Paperin käytössä on samat ongelmakohtat kuin muovin.

3.7 Rakennusten vaipan ilmatiiviiden mittaaminen

Rakennuksen ilmanvuotolukua tarvitaan lähtötietona rakennuksen lämmöntarpeen laskennassa. Uudisrakennusten osalta lämmöntarvetta tarkastellaan rakennuslupavaiheessa lämpöhäviöiden tasauslaskelmassa sekä energiaselvitystä ja -todistusta laadittaessa. Energiatodistuksen ilmanvuotoluvun arvo tarkastetaan tarvittaessa mittaamalla ennen rakennuksen käyttöönottoa.

Käytössä olevien ns. vanhojen rakennusten osalta ilmanvuotolukua tarvitaan mahdollisen energiakatselmuksen yhteydessä ja jos rakennukselle laaditaan energiatodistus.

Tiiviysmittauksella ei pelkästään määritetä rakennuksen ilmanvuotolukua. Mittauksen avulla paikannetaan uudisrakennusten laadunvalvonnan yhteydessä rakennuksen ilmanvuotoreitit korjausten ja tiivistystoimenpiteiden toteuttamiseksi. Käytössä olevissa rakennuksissa tiiviysmittausta voidaan käyttää arvioitaessa epäpuhtauksien kulkeutumisreittejä.

Rakentamismääräyksissä vaipan ilmanpitävyys kuuluu lämpöhäviöiden tasauslaskennan piiriin. Suunnitteluvaiheessa ilmanvuotoluvun raja-arvona voidaan käyttää rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa arvoa 4,0; tällöin ei edellytä vielä rakennuksen ilmanvuotoluvun mittausta.

Tätä raja-arvoa pienemmän ilmanvuotoluvun käyttäminen suunnittelussa edellyttää, että ko. arvo on osoitettu mittaamalla tai muulla ilmoitusmenettelyllä. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittamisessa ja energialaskennassa voidaan siis käyttää myös pienempää ilmanvuotoluvun arvoa, jos sen saavutettavuus pystytään osoittamaan kohdekohtaisella mittauksella tai ilmoitusmenettelyllä. Ilmoitusmenettely on yksi mahdollinen menettely rakennusten ilmanpitävyyden osoittamiseksi siten, että mittauksia ei tarvitse tehdä jokaisessa rakennuksessa. On kuitenkin muistettava, että vain kohdekohtainen ilmanvuotoluvun mittaus kertoo todellisen laadun juuri siitä kyseisestä rakennuksesta. Ilmatiivyyttä mitattaessa tutkitaan rakennuksen vaipan läpäisevää ilmavirtausta. Vaipalla tarkoitetaan karkeasti rakennusosia, jotka erottavat lämpimät osat kylmistä osista ja ulkoilmasta. Ilma voi virrata vaipan rakenteiden läpi tai vaipan rakojen ja reikien kautta. Yleisimmin nämä ilmanvuotokohtat ovat ikkunoiden ja ovien liitoskohdat sekä erilaisten hormien liitokset vaippaan.

3.7.1 Ilmanvuotoluvun mittaustavat ja menetelmät

Rakennuksen tai sen osien tiivyyttä mitataan ns. paine-eromenetelmällä, jossa tutkittavaan tilaan aiheutetaan paine-ero ulkoilmaan nähden. Paine-ero saadaan aikaan puhallimella. Puhallin asennetaan yleisimmin ulko-oven, mutta voidaan asentaa myös ikkunan tuuletusluukun, paikalle. Puhaltimena voidaan käyttää myös rakennuksen omaa ilmanvaihtolaitteistoa. [Paloniitty 2012: 29.]



Kuva 14. Tiiviysmittauslaitteisto asennettuna rakennuksen ulko-oveen.

Rakennusvaipan ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla määritetään standardissa *SFS-EN 13829* määritetyllä tavalla. Ilmanvuotoluku mitataan standardissa esitetyllä mittausmenetelmällä B, joka tarkoittaa rakennuksen vaipan testausta siten, että rakennukseen tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot, kuten ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmakanavat, korvausilmaventtiilit sekä tulisijat ja hormit suljetaan tiiviisti teip- paamalla tai muulla luotettavalla tavalla. Myös ovien ja ikkunoiden tulee olla kiinni mit- tauksen aikana [RT 80-10974: 10].



Kuva 15. Ilmanvaihtoreitit tukittuna

Ilmanvuotoluvun määrittäminen tapahtuu tätä varten tehdyllä painekoelaitteistolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös rakennuksen omia ilmanvaihtolaitteita. Käytet- täessä rakennuksen omia ilmanvaihtolaitteita, mittausmenetelmää B noudatetaan so- veltuvin osin. Paineekoelaitteistolla tehdyn tiiviysmittauksen mittaustulos on luotetta- vampi, joten ilmanvuotoluku tulisi määrittää ensisijaisesti sillä. [RT 80-10974: 10.]

Ilmanvuotoluvun määrittäminen pien- tai kerrostalon omalla ilmanvaihtolaitteistolla edellyttää, että rakennuksessa on keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä, joko poistoilman- vaihto tai keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihto. Keskitetyllä poistoilmanvaihtojärjestel- mällä varustetussa rakennuksessa voidaan tehdä alipainekoe, kun huoneiston tai huone- istojen korvausilmakanavat suljetaan ja ilman tilavuusvirta mitataan puhaltimen tai IV-koneen poistoilmakanavasta. Koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetussa

rakennuksessa voidaan tehdä sekä ali- että ylipainekoe. Koe toteutetaan sulkemalla joko IV-koneen tulo- tai poistoilmakanava mittauksen ajaksi ja mittaamalla ilman tilavuusvirta avoimena olevasta kanavasta. IV-koneen avulla tehtävissä painekokeissa on tärkeää varmistaa, että mitattava tila sisältää kaikki tilat, joiden ilmanvaihdosta IV-kone huolehtii. [RT 80- 10974: 10.]

3.7.2 Paineekokeen toteutus ja ilmanvuotoluvun laskeminen

Paineekokeessa määritetään ilman tilavuusvirta. Halutun sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron saavuttamiseksi täytyy rakennukseen puhaltaa ilmaa ylipainekokeessa. Ali-paineekokeessa rakennuksesta taas puhalletaan ilmaa pois. Ilman tilavuusvirrat määritetään portaittain eri paine-eroilla vähintään 50 Pa paine-eroon asti.

Mittaus tehdään useammalla paine-erolla (yleensä vähintään viidellä SFS-EN 13829). Paine-eron ylläpitämiseksi tarvittavat puhaltimen läpi virtaavat ilmamäärät mitataan. Mittaussarjasta lasketaan vuotoilmakäyrä, jonka avulla lasketaan 50 Pa paine-eroa vastaava ilmamäärä. [Paloniitty 2012: 29.]

Kun 50 Pa paine-eron ylläpitämiseksi tunnin aikana tarvittava ilmamäärä Q jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella V , antaa tämä tulokseksi ns. ilmanvuotoluvun n_{50} . Jos ilmamäärä jaetaan vaipan alalla A , saadaan tulokseksi ilmanvuotoluku q_{50} . Ilmanvuotoluku n_{50} esitetään yksikössä 1/h, vaihtoa tunnissa. Ilmanvuotoluku q_{50} esitetään yksikössä $m^3/(h m^2)$.

Ilmanvuotoluku, n_{50} -luku 1/h, voidaan laskea kaavalla 9.

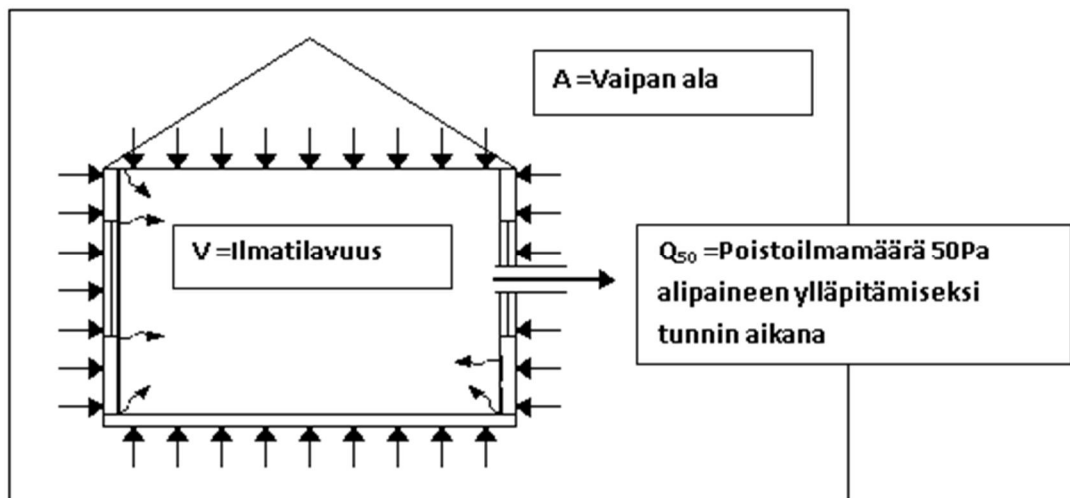
$$n_{50} = Q_{50}/V \quad (9)$$

missä n_{50} = rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla 1/h
 Q_{50} = painekokeella mitattu ilmavirtaus 50 Pa paine-erolla m^3/h
 V = rakennuksen/ mitattavan osan sisäilmantilavuus m^3

Rakennuksen ilmanvuotoluku voidaan määrittää myös vaipan pinta-alaa kohti q_{50} -lukuna $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. q_{50} -luku voidaan laskea kaavalla 10.

$$q_{50} = Q_{50}/A \quad (10)$$

missä q_{50} = rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$
 Q_{50} = painekokeella mitattu ilmavirtaus 50 Pa paine-erolla m^3/h
 A = rakennuksen/mitattavan osan ulkovaipan ala m^2



Kuva 16. Vaipan tiiviysmittauksen periaatekuva. [Paloniitty 2012]

Ilmanvuotoluku on matemaattisen laskutoimituksen perusteella saatava arvo. Tästä johtuen n_{50} -luku pienenee yleensä rakennuksen tilavuuden kasvaessa vaikka vaipan ilmanpitävyys ei paranekaan. Tämä johtuu siitä, että sisätilavuuden kasvaessa yleensä myös suhde Q / V kasvaa. Esimerkiksi pientaloissa suhde Q / V vaihtelee tyypillisesti välillä 0,7–1,5, mutta kerrostaloissa suhde on tyypillisesti välillä 2,0–3,5, jos ilmanpitävyys mitataan koko portaan tai koko rakennuksen mittauksena. Tästä johtuen q_{50} -luku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä suuremmissa rakennuksissa. Ilmanpitävyyden mittaustuloksena onkin suositeltavaa ilmoittaa sekä n_{50} - että q_{50} -luku. [RT 80- 10974: 11.]

Ilmanvuotoluvun mittaustulokset annetaan 0,1 1/h ja 0,1 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ tarkkuudella ja pyöristetään normaalien pyöristyssääntöjen mukaisesti. Rakennuksen ilmanvuotoluku on mahdollista määrittää myös alle 50 Pa paine-erolla, jos painekokeessa saavutetaan vähintään 30 Pa paine-ero ja mittaukset on tehty portaitaisesti tasaisin välein vähin-

tään kolmella eri paine-erolla. Kesäaikana, kun ulkolämpötila on ≥ 15 °C ja tuulen nopeuden ollessa ≤ 1 m/s, voidaan hyväksyä myös vähintään 20 Pa paine-ero. Alemmissa paine-eroissa saatujen mittaustulosten perusteella saadut arvot interpoloidaan vastaamaan 50 Pa paine-eroa vastaavaa ilmanvuotolukua. [RT 80- 10974: 11.]

Paine-ero pyritään mittaamaan tuulelta suojassa olevan julkisivun puolelta. Käytännössä esimerkiksi ulko-oveen kiinnitettävässä painekoelaitteistossa paine-eron mittaus tapahtuu kuitenkin ulko-oven kohdalta, jolloin ulko-oven sijainti määrää mittaussuunnan. Tarvittaessa tehdään paine-eron tarkistusmittauksia erillisillä mittareilla muista ilmansuunnista.

Ympäristöministeriön julkaisemassa Tasauslaskentaoppaassa 2012 (oppaan liitteessä 3) ohjeistetaan, että ilmanvuotoluku mitataan 50 Pa alipainetilanteessa. On kuitenkin suositeltavaa, että mittaus tehdään sekä yli- että alipainetilanteessa, koska vaipan tiiviyys voi muuttua merkittävästikin paine-eron suunnan muuttuessa. Esimerkiksi osa ilmansulun vuotokohdista voi sulkeutua tai avautua riippuen ilmavirran suunnasta. Jos mittaus tehdään sekä yli- että alipainetilanteessa ja vaipan ilmanvuotoluvut eroavat toisistaan enintään 0,5 1/h, käytetään rakennuksen ilmanvuotolukuna mittausten keskiarvoa. Muussa tapauksessa ilmanvuotoluvuksi valitaan suurempi mittaustulos. [RT 80- 10974: 11.]

3.7.3 Ilmatilavuuden laskeminen mittausta varten

Rakennuksen ilmanpitävyyden mittaukseen otetaan mukaan kaikki tilat, jotka ovat selvästi ilmanpitävän vaipan sisäpuolella. Mitattavaan tilaan kuuluvat yleisesti kaikki lämmitetyt ja jäähdytetyt tilat sekä tilat, joissa on koneellinen ilmanvaihto. Rakennuksissa tehtävissä osittaisissa paine-eromittauksissa mitattavaan tilaan otetaan pääsääntöisesti mukaan kaikki saman palo-osaston sisällä olevat tilat. Jos mitattavaan kohteeseen liittyy tila, joka on erikseen lämmitetty tai jäähdytetty ja sen ulkovaippa on lämpöeristetty, mutta se on selvästi ilmanpitävän vaipan ulkopuolella eikä tilan vaipparakenteissa ole tiivistä ilmansulkua, tila jätetään mittauksen ulkopuolelle. Tällöin mitattavasta tilasta tähän tilaan johtavat ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot tiivistetään ja tilaan johtavat kulkuaukot suljetaan. [RT 80- 10974: 12.]

Edellä mainitun mukaisesti rakennuksen mitattavaan tilaan otetaan mukaan myös esimerkiksi tekniset tilat, autotallit, varastot ja kellarit, jos ne ovat ilmanpitävän vaipan sisäpuolella. Tämä pätee riippumatta siitä, ovatko tilat lämmitettyjä tai onko niihin erillinen sisäänkäynti ulkoa. Sama koskee esimerkiksi loma-asuntojen yhteydessä olevia saunaosastoja ja WC-tiloja, joihin on ulkoa erillinen sisäänkäynti. Väliseinien ilmatiiviyttä voidaan arvioida painekokeen yhteydessä mittaamalla paine-ero seinän yli. Jos rakennuksen ilmatiiviyttä mitataan rakennuksen omalla ilmanvaihtokoneella, on mittaukseen otettava mukaan kaikki ne tilat, joiden ilmanvaihto tapahtuu laitteiston kautta. [RT 80- 10974: 12.]



Kuva 17. Etäisyysmittari. Mittari laskee mitattujen etäisyysmittojen perusteella pinta-aloja ja tilavuuksia.

Ilmanvuotoluvun laskennassa käytettävä rakennuksen sisäilman tilavuus lasketaan Suomen rakentamismääräyskokoelmassa D5 määritetyn rakennuksen ilmatilavuuden mukaan. Rakennuksen ilmatilavuus on huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan lasketun pinta-alan tulo. Välipohjia ei lasketa rakennuksen ilmatilavuuteen. Huoneiston ilmatilavuus lasketaan vastaavalla tavalla kuin rakennuksen ilmatilavuus. Näin ollen huoneiston tilavuuden laskenta poikkeaa Suomen rakentamismääräyskokoel-

massa D5 määritetystä huoneiston ilmatilavuudesta siltä osin, että väliseinät otetaan mukaan ilmatilavuuteen. [RT 80- 10974: 12.]

Rakennuksen ja huoneiston ilmatilavuuden laskenta poikkeaa siltä osin myös standardissa SFS-EN 13829 esitetystä ohjeista, että ilmatilavuuden laskentaan otetaan mukaan myös korkeudeltaan alle 160 cm olevien tilojen sekä väliseinien ilmatilavuus. Alle 160 cm korkeiden tilojen huomioiminen laskennassa kuvaa paremmin tutkittavan rakennuksen todellista ilmatilavuutta. Väliseinien mukaanotto taas helpottaa ilmatilavuuden laskentaa merkittävästi, mutta niiden aiheuttama virhe lopputuloksessa on vähäinen. Mitattavien tilojen valinnasta ja tilavuuden määrittämisestä annetaan tarkemmin ohjeita pien- ja kerrostaloille annetuissa erillisissä ohjeissa luvuissa 3.7.6 ja 3.7.7.[RT 80- 10974: 12.]

Uusissa rakennuksissa ilmanvuotoluvun mittaus on suositeltavaa tehdä siinä vaiheessa rakentamista, kun kaikki ulkovaipan ilmanpitävyyteen vaikuttavat rakennustyöt on tehty valmiiksi, mutta mahdolliset ilmanvuotokohtien lisätiivistyksen voidaan vielä suorittaa. Jos ilmanvuotoluvun suunnitteluarvoa on käytetty lämpöhäviöiden kompensoinnissa ja mittaustulos poikkeaa suunnitteluarvosta huonompaan suuntaan, on tehtävä lisätiivistäminen ja uusintamittaus. Tätä jatketaan tarvittaessa niin kauan, että päästään suunnitteluarvon mukaiselle tasolle. Mittauksen yhteydessä vuotoreitit voidaan paikallistaa joko lämpökameralla tai merkkisavulla ja siten mahdollistetaan vuotokohtien välitön tiivistäminen. Tällä menettelyllä voidaan parantaa myös sellaisten rakennusten ilmanvuotolukua, joissa se ei ole välttämätöntä lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittamiseksi. [RT 80- 10974: 12.]

3.7.4 Tiiviysmittausraportin sisältö

Ilmanpitävyydsmittauksesta laaditaan raportti, jossa esitetään vähintään seuraavat tiedot [Tasauslaskentaopas 2012]:

- rakennuksen tunniste- ja laajuustiedot
- rakennuksen tai sen mitatun osan ilmatilavuus
- rakennuksen tai sen mitatun osan vaipan pinta-ala
- mittaajan nimi ja mittauspäivämäärä
- säätiedot
 - ulkolämpötila

- tuulen nopeus
- tuulen suunta
- ilmanpaine
- tiiviysmittausten kattavuus
 - koko rakennus/ osarakennus
- tiedot mittauksissa käytetyistä laitteista ja koejärjestelyistä
 - kalibrointitiedot
 - paine-eron tuottamistapa
 - apupuhallin
 - oma ilmanvaihtojärjestelmä
 - mittauspisteiden sijainti
 - mittauksen ajaksi suljetut aukot
 - mahdolliset poikkeamat standardista *SFS-EN 13829*
- mittaustulokset
 - mittauspaine-erot
 - mitatut vuotoilmavirrat eri paine-eroilla
 - sisälämpötila
 - ulkolämpötila
 - ilmanpaine
- mittaustuloksista määritetty vuotoilmavirta 50 Pa:n paine-erolla
- vaipan ilmanvuotoluku q_{50} .

3.7.5 Mittalaitteiden tarkkuus ja kalibrointi

Painemittauslaitteistojen mittaustarkkuudessa esiintyy käytännössä huomattaviakin merkki- tai laitekohtaisia eroja pienillä rakennuksen vuotoilmavirroilla ja ilmanvuotolu-
vuilla (ilmanvuotoluvun ollessa $< 1,5$ 1/h). Tästä syystä johtuen on mahdollista, että
mittaustulokset voivat vaihdella tällä alueella huomattavasti. Ilmanpitävyysraportissa
tuleekin aina mainita mittauslaitteiston merkki ja soveltuvuus pienten ilmavirtojen ja
vuotolukujen mittaukseen sekä tarkkuus eri ilmavirroilla, jos se on määritetty testikokei-
den avulla. Rakennusvalvonta voi perustellusta syystä edellyttää tarkistusmittausta
toisella laitteella, jos mittaustulokset on määritelty laitteistolla, jonka soveltuvuus on
todettu puutteelliseksi tuloksena esitetylle ilmavirta- tai vuotolukutasolle. Painekekees-
sa käytettävät mittauslaitteet on kalibroitava säännöllisesti. Ellei käytettäville laitteille
ole annettu valmistajan taholta erillisiä kalibrointivälejä, voidaan painekoelaitteistolla
käyttää kahden vuoden ohjeellista kalibrointiväliä. Virtaus- ja paine-eromittareiden oh-

jeellinen kalibrointiväli on neljä vuotta. Laitteiston vaurioitua on aina suoritettava uusi kalibrointi vaurion korjaamisen jälkeen. [RT 80- 10974: 13.]

3.7.6 Pientalojen mittausohjeet

Useita huoneistoja sisältävän pientalon (pari- tai rivitalo) ilmanvuotoluku voidaan määrittää mittaamalla ilmanpitävyys vähintään rakennuksen yhdestä huoneistosta. Rivitalossa mitattavan huoneiston tulee olla päätyhuoneisto, jotta mitattava tila rajoittuisi mahdollisimman suurelta osalta ulkovaippaan. Myös siinä tapauksessa, että rivitalosta mitataan useampia huoneistoja, vähintään yhden niistä tulee olla päätyhuoneisto. Mittattaessa pientalosta useampia huoneistoja, on rakennuksen ilmanvuotoluku huoneistoista saatujen mittaustulosten keskiarvo. [RT 80- 10974: 13.]

Useasta huoneistosta koostuvan pientalon pelkän ulkovaipan ilmanvuotoluvun selvittämiseksi on kaikki huoneistot paineistettava samaan paineeseen yhtä aikaa, jotta ilma ei virtaa merkittävästi huoneistojen välisten seinien läpi. Tämä edellyttää, että jokaiseen huoneistoon asennetaan oma painekoelaitteisto tai että painekoe tehdään pientalon omilla IV-koneilla samanaikaisesti. Rakennuksen ilmanvuotoluvuksi saadaan tässä tapauksessa huoneistokohtaisten ilmanvuotolukujen keskiarvo. [RT 80- 10974: 13.]

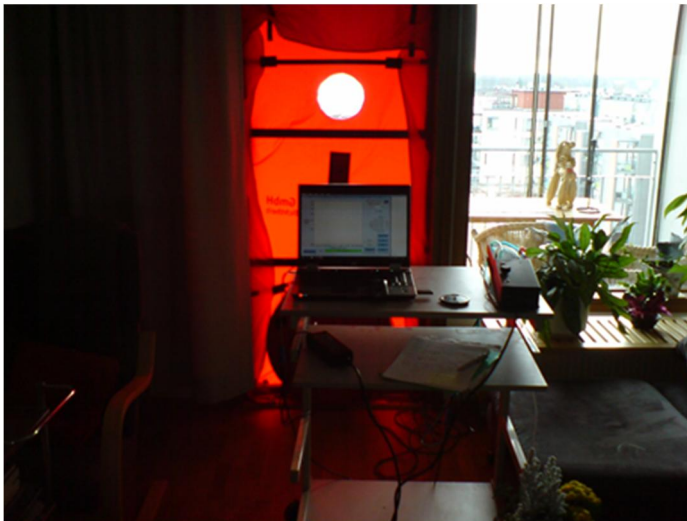
Jos useammasta huoneistosta koostuvan pientalon (rivi- tai paritalot) vaipassa on käytetty useita eri toteutusratkaisuja (esimerkiksi puu- ja kivirakenteinen ulkoseinä), tulee mitattava huoneisto tai huoneistot valita tutkimukseen siten, että ne sisältävät kaikilla tällaisilla toteutusratkaisulla tehtyjä vaipan osia. Jos edellä mainittuja huoneistoja ei ole, on suositeltavaa, että pientalon kaikki huoneistot mitataan luotettavan mittaustuloksen saamiseksi. [RT 80- 10974: 13.]

Pientalossa tehtävässä painekokeessa vaipan yli vallitseva paine-ero voidaan mitata yhdellä paine-eromittarilla. Paine-ero on suositeltavinta mitata läheltä rakennuksen sisäkorkeuden puoliväliä. Paineekoelaitteistoa käytettäessä, paine-eron mittaus tapahtuu käytännössä usein ulko-ovesta, johon laitteisto on kiinnitetty. Tarvittaessa on hyvä käyttää lisämittareita tarkistusmittauksiin. [RT 80- 10974: 13.]

3.7.7 Kerrostalojen mittausohjeet

Kerrostaloissa ilmanpitävyys on mahdollista mitata joko yksittäisistä huoneistoista, yhdestä tai useammasta kokonaisesta portaasta tai koko rakennuksesta. Eri menetelmillä mitattuja kerrostaloja voidaan kuitenkin käyttää saman talotyypin ilmoitetun ilmanvuotoluvun määrittämiseen. Suoritettaessa mittausta huoneistokohtaisena mittauksena yksittäisistä huoneistoista tai useammasta kokonaisesta portaasta, kerrostalon ilmanpitävyys on saatujen mittaustulosten keskiarvo.

Yksittäisten huoneistojen ilmanpitävyys mitataan helpoimmin painekoelaitteistolla. Koko portaan tai koko rakennuksen ilmanpitävyys voidaan mitata joko painekoelaitteistolla tai rakennuksen omalla keskitetyllä ilmanvaihtokoneella. Yksittäisten huoneistojen mittauksessa ei eritellä ulkovaipan ja huoneistojen välisiä ilmavuotoja, joten koko portaan tai koko rakennuksen ilmanpitävyyden mittaus antaa tältä osin tarkemman tuloksen kerrostalon ulkovaipan ilmanpitävyydestä.

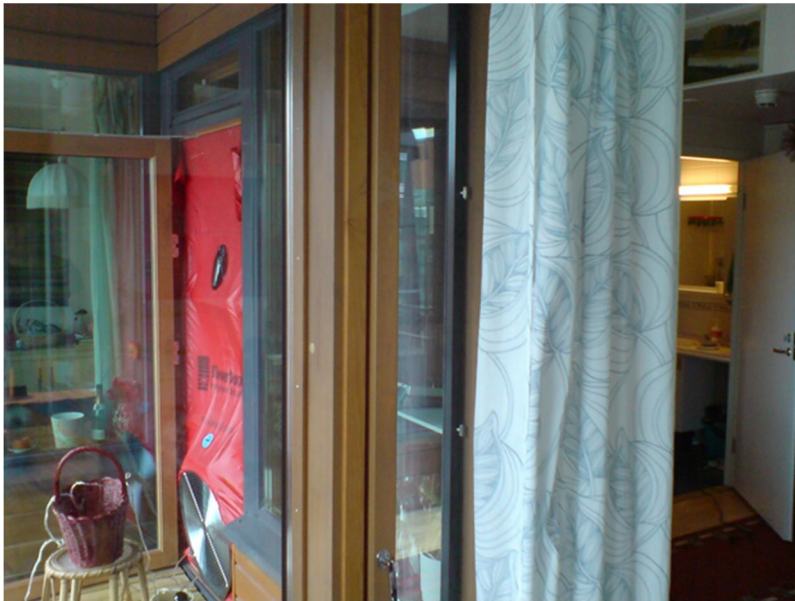


Kuva 18. Tiiviysmittauslaitteisto parvekkeen oviaukossa.

Toisaalta koko portaan tai koko rakennuksen ilmanpitävyyden mittaus muuttaa yleensä merkittävästi rakennuksen sisätilavuuden ja vaipan sisäpinta-alan välistä suhdetta verrattuna yksittäisten huoneistojen mittaukseen. Tämä pienentää yleensä n_{50} -luvun arvoa, vaikka ulkovaipan ilmanpitävyys ei todellisuudessa paranekaan. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että kerrostalon ilmanpitävyydestä saadaan riittävän hyvä kuva sekä yksittäisten huoneistojen mittauksella että koko portaan tai koko rakennuksen mittauksella. [RT 80- 10974: 14.]

Huoneistokohtainen mittaaminen

Ilmanvuotoluvun määrittäminen yksittäisten huoneistojen mittaustuloksista edellyttää yhteensä vähintään 20% huoneistojen mittausta kustakin talosta [RakMk D3. 2012: 10]. Huoneistot tulee mitata eri kerroksista siten, että vähintään yksi huoneisto mitataan alimmasta ja ylimmästä kerroksesta ja lisäksi mitataan vähintään yksi huoneisto joka toisesta välikerroksesta. Kerrostalon ilmanvuotoluku on huoneistoista saatujen mittaustulosten keskiarvo.



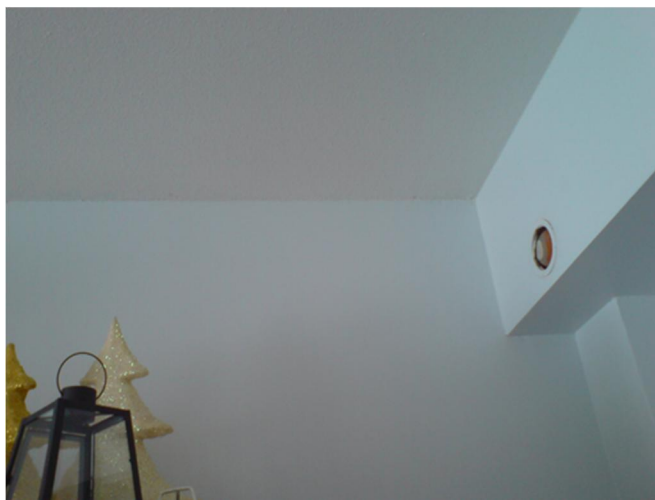
Kuva 19. Mittauslaitteisto kuvattuna ulkopuolelta kerrostalon huoneistokohtaisessa mittauksessa.

Jos kerrostalon vaipassa on käytetty useita eri toteutusratkaisuja, jotka edellyttävät vähintään kuuden rakennuksen otoksen mittausta (esimerkiksi betonielementti- ja puurakenteinen ulkoseinä), tulee mitattavat huoneistot valita tutkimukseen siten, että ne sisältävät kaikilla toteutusratkaisulla tehtyjä vaipan osia. Tällöin mitattavien huoneistojen määrää on tarvittaessa lisättävä niin, että mittaustulokset kuvaavat kattavasti koko kerrostalon vaipan ilmanpitävyyttä. Tällaisissa tapauksissa onkin suositeltavampaa, että kerrostalon ilmanpitävyys määritetään koko portaan tai koko rakennuksen mittauksena. Kerrostalohuoneistossa tehtävässä mittauksessa painekoelaitteisto asennetaan huoneiston ulko-oveen, mutta paine-eromittaus tehdään ulkovaipan yli. Paine-ero voidaan mitata yhdellä paine-eromittarilla. Paine-ero on suositeltavinta mitata läheltä huoneiston sisäkorkeuden puoliväliä. [RT 80- 10974: 14.]

Porrashuoneista tehtävä mittaaminen

Porrashuoneellisissa kerrostaloissa ilmanvuotoluvun määrittäminen voidaan tehdä myös joko koko portaasta tai koko rakennuksesta. Edellytyksenä tämän mittaustavan onnistumiselle on, että huoneistojen ulko-ovet ovat porrashuoneeseen avoinna ja huoneistoissa olevat tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot, tulisijat ja hormit on suljettu tiiviisti. [RT 80- 10974: 15.]

Koko portaassa tai koko rakennuksessa tehtävä painekoe tulee toteuttaa ensisijaisesti siten, että painekoelaitteisto asennetaan kerrostalon keskikerrokseen, esimerkiksi parvekeoveen, joka on lähellä rakennuksen sisäkorkeuden puoliväliä. Tällöin vaipan yli vallitseva paine-ero voidaan mitata yhdellä, laitteiston yhteydessä olevalla paine-eromittarilla. Paine-eroa on kuitenkin tarpeellista seurata kokeen aikana myös talon ylimmässä ja alimmassa kerroksessa. On suositeltavaa, että paine-eroa pidetään yllä jonkin aikaa ennen varsinaisen mittauksen tekoa varsinkin suurimmilla paine-eroilla. Tällä varmistetaan, että paine-ero pääsee muodostumaan ulkovaipan yli kaikkialla porrashuoneessa. [RT 80- 10974: 15.]



Kuva 20. Huoneiston ilmanvaihtokanava on tukittu ilmalla täytettävällä kumipallolla.

Kun painekoelaitteisto asennetaan parvekkeen oveen, on huomioitava, että mahdollisten lasitettujen parvekkeiden lasit ovat kokeen aikana auki. Lisäksi parvekkeen koko ja muoto tulee olla sellainen, että puhaltimesta tuleva ilmavirta pääsee kohtuullisen esteettömästi virtaamaan ulkoilmaan alipainekokeen aikana. [RT 80- 10974: 15.]

Jos paine-eroa ei mitata rakennuksen sisäkorkeuden puolivälin läheltä, tulee paine-ero mitata myös sekä ylimmästä että alimmasta kerroksesta. Näin varmistetaan, että painekoe suoritetaan oikeassa paine-erossa eikä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero pääse vaikuttamaan mittaustulokseen merkittävästi. Tämän tilanteen esiintyminen on mahdollinen esimerkiksi silloin, jos painekoelaitteistoa ei voida jostain syystä asentaa kerrostalon keskikerrokseen tai jos portaan ilmanvuotoluku mitataan kerrostalon omalla ilmanvaihtolaitteistolla. Näissä tapauksissa paine-erona käytetään ylimmän ja alimman kerroksen mittaustulosten keskiarvoa. Paine-eromittaus tulee tehdä siten, että mittaustulokset tallennetaan pidemmältä aikaväliltä ja keskiarvot lasketaan jälkikäteen. Tällöin on tärkeää varmistaa, että eri mittareilla mitatut paine-erot vastaavat samaa ajanhetkeä. [RT 80- 10974: 15.]



Kuva 21. Useammalla laitteella suoritettava painekoe.

Jos painekoelaitteisto on asennettu alakerran ulko-oveen, on alipainekokeessa syytä mitata ilman tilavuusvirrat myös 50 Pa suuremmilla paine-eroilla. Tämä johtuu siitä, että painekoelaitteisto säättää ilman tilavuusvirtaa laitteiston yhteydessä olevan paine-eroanturin perusteella. Tällöin lukemat vastaavat talon ala-osassa olevaa paine-eroa,

joka voi olla huomattavasti suurempi kuin portaan keskimääräinen paine-ero, varsinkin talviaikaan. [RT 80- 10974: 15.]

Suoritettaessa vanhojen kerrostalojen seurantamittauksia koko portaan tai koko rakennuksen mittauksena voi huoneistojen ovien aukipitäminen olla vaikeaa asukkaiden ja mahdollisten lemmikkieläinten takia. Jos uuden kerrostalon ilmanvuotoluku on ollut alhainen ($\leq 1,0$ 1/h), voidaan seurantamittaus tehdä siten, että avataan ainoastaan huoneistojen väliovet ja postiluukut. Tällöin postiluukkujen kautta tehtävä mittaus ei vielä merkittävästi muuta mittaustulosta (mittaustulokset ovat tyypillisesti enintään 0,1 1/h pienempiä kuin ulko-ovet auki tehdyssä mittauksessa). Muussa tapauksessa huoneistojen ulko-ovet tulee avata porraskäytävään. Kerrostalojen yhteisten tilojen ovet (esimerkiksi oleskelu-, varasto- ja saunatilat) on aina pidettävä avoinna porrashuoneesta suoritettavan seurantamittauksen aikana riippumatta siitä, mikä kerrostalon ilmanvuotoluku on ollut uutena mitattaessa. [RT 80- 10974: 16.]

Jos ilmanpitävyyden määrittäminen tehdään useampiportaisessa kerrostalossa ainoastaan yhdestä portaasta, ilmanvuotoluku tulee määrittää päätyportaasta, jotta mitattava tila rajoittuisi mahdollisimman suurelta osalta ulkovaippaan. Lisäksi mitattava porraskäytäville tulee pyrkiä valitsemaan siten, että siihen ei liity yhteisiä tiloja muiden portaiden kanssa. Siinä tapauksessa, että kerrostalosta mitataan useampia portaita, tulee vähintään yhden niistä olla päätyportas. Kerrostalon ilmanvuotoluku on tässä tapauksessa portaista saatujen mittaustulosten keskiarvo. [RT 80- 10974: 16.]

Jos mitattavalla portaalla on yhteisiä tiloja muiden portaiden kanssa, on mitattava tila määritettävä siten, että se noudattaa pääsääntöisesti palo-osaston mukaisia rajoja. Otettaessa yhteiset tilat mukaan mitattavaan alueeseen on syytä varmistua siitä, että erilaiset läpiviennit, kuten ovet ja luukut, muihin portaisiin on suljettu mittauksen ajaksi. [RT 80- 10974: 16.]

Kun halutaan selvittää useasta portaasta koostuvan kerrostalon pelkän ulkovaipan ilmanvuotoluku, on kaikki portaat paineistettava samaan paineeseen yhtä aikaa, jotta ilma ei virtaa merkittävästi portaiden välisten seinien läpi. Tämä edellyttää sitä, että jokaiseen portaaseen asennetaan oma painekoelaitteisto tai että painekoe tehdään kerrostalon omilla keskitetyillä IV-koneilla samanaikaisesti. Kerrostalon ilmanvuotoluku saadaan tässä tapauksessa porraskohtaisten ilmanvuotolukujen keskiarvona. [RT 80- 10974: 16.]

Kerrostalon koko portaassa tai koko rakennuksessa tehtävän ilmanvuotoluvun määrittämisen onnistumisen edellytyksenä on, että mittauksen toteuttaa useamman henkilön mittausryhmä. Varsinkin paine-erojen seuranta eri kerroksissa tai eri portaissa ja mittaus tulosten sovittaminen ajallisesti toisiaan vastaaviksi vaatii hyvää suunnittelua ja viestintävälineiden käyttöä. [RT 80- 10974: 16.]

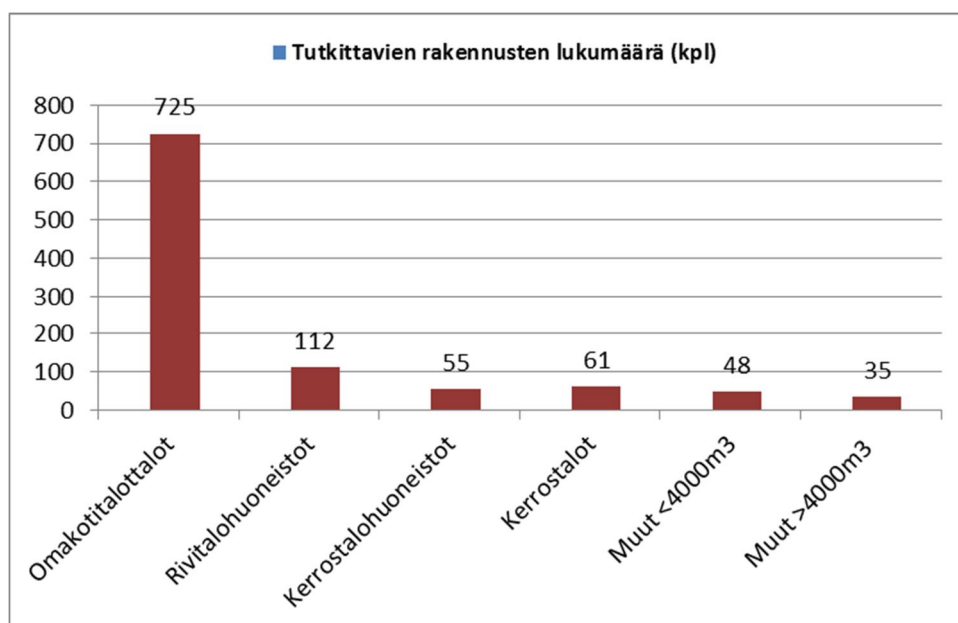


Kuva 22. Suuren rakennuksen tiivyyden mittaaminen.

4 Tutkimuksen toteutus ja tulokset

Tutkimus toteutettiin keräämällä toteutunutta tiiviysmittaustietoa alan sertifioiduilta rakennusten ilmatiiviuden mittaajilta. Tutkimusta varten laadittiin valmis Excel-taulukko, johon mittaajat merkitsivät tuloksensa (liite 1). Excel-taulukko lähetettiin tiiviysmittaajille saatekirjelmän kanssa sähköpostin liitteenä ja vastauksia saatiin noin kolmelta-kymmeneltä eri mittaajalta.

Mittaustuloksia saatiin hieman yli tuhannesta rakennuksesta (kuva 23) käsittäen 725 omakotitaloa, 112 rivi- ja paritalo- huoneistoa, 55 kerrostalo- huoneistoa, 61 kerrostalota sekä 83 muuta rakennusta. Rakennusten rakentamisvuodet sijoittuvat vuosille 1920-2012.



Kuva 23. Kaaviossa on esitetty tutkittavien rakennusten lukumäärä rakennustyy- peittäin.

Tiiviysmittaustulokset jaoteltiin ryhmiin rakennustyypeittäin seuraavasti;

- pientalot (omakoti-, pari- ja rivitalot)
- kerrostalot
- kerrostalo- huoneistot
- muut kohteet (teollisuus-, varasto-, myymälä-, liike- ja koulurakennukset).

Pientalot on lisäksi jaoteltu rakennusvuoden, runkomateriaalin ja kerrosten lukumäärän mukaan.

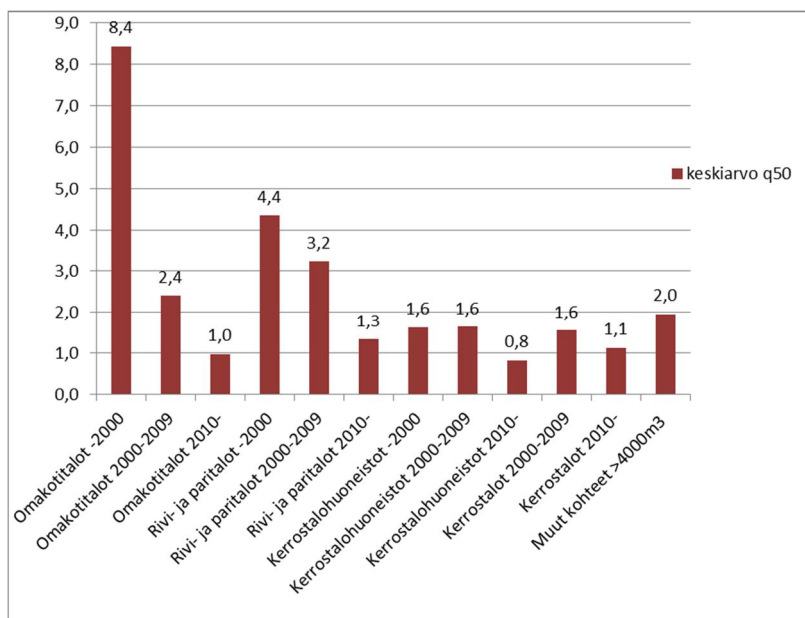
Kerrostalot ja kerrostalohuoneistot on jaoteltu rakennusvuoden ja runkomateriaalin mukaan.

Muut rakennukset, jotka käsittävät teollisuushallit, varasto-, myymälä-, liike- ja koulurakennukset, jaoteltiin tilavuuden mukaan pienempiin (<4000 m³) ja suurempiin (>4000 m³) rakennuksiin.

Tuloksista määritettiin ilmanvuotolukujen keskiarvot, vaihteluvälit sekä n_{50} - ja q_{50} -luvun ero toisiinsa nähden.

Lisäksi tutkimuksessa kerättiin tietoa kohteista, joissa kerrostalon tiiviysmittaus on toteutettu samassa kohteessa sekä huoneistokohtaisena että koko rakennuksen tai porrashuoneen käsittävänä mittauksena.

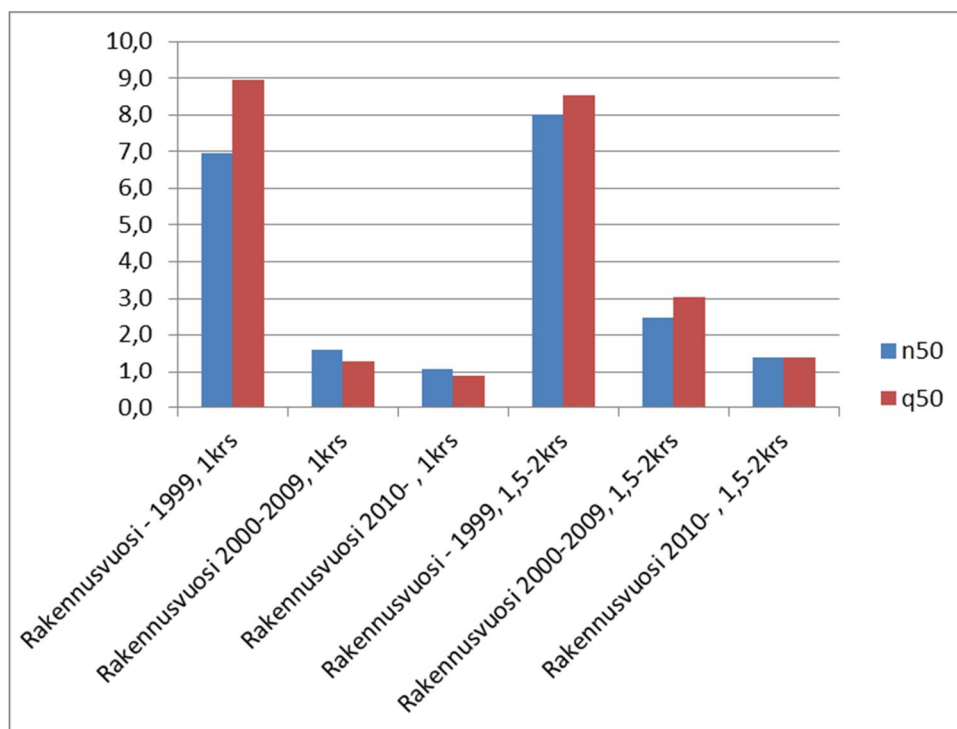
Rakennusten ilmatiivyyteen on kiinnitetty huomiota vasta viime vuosina. Tutkimuksessa kerätystä aineistosta voidaan nähdä miten rakennusten ilmatiiviyys on kehittynyt (kuva 24) viime vuosikymmenten aikana.



Kuva 24. Kaaviossa on esitetty rakennustyypeittäin ilmanvuotoluvun q_{50} kehittyminen.

4.1 Pientalot

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella pientalojen ilmapuotoluvut ja sitä kautta ilmatiiviyys on parantunut huomattavasti viime vuosikymmeninä. Merkittävä parantuminen näyttää tulosten perusteella tapahtuneen vuosituhatteen vaihteessa.



Kuva 25. Kuvaajassa on esitetty kaikkien pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot rakennusajankohdan ja kerrosten lukumäärän mukaan.

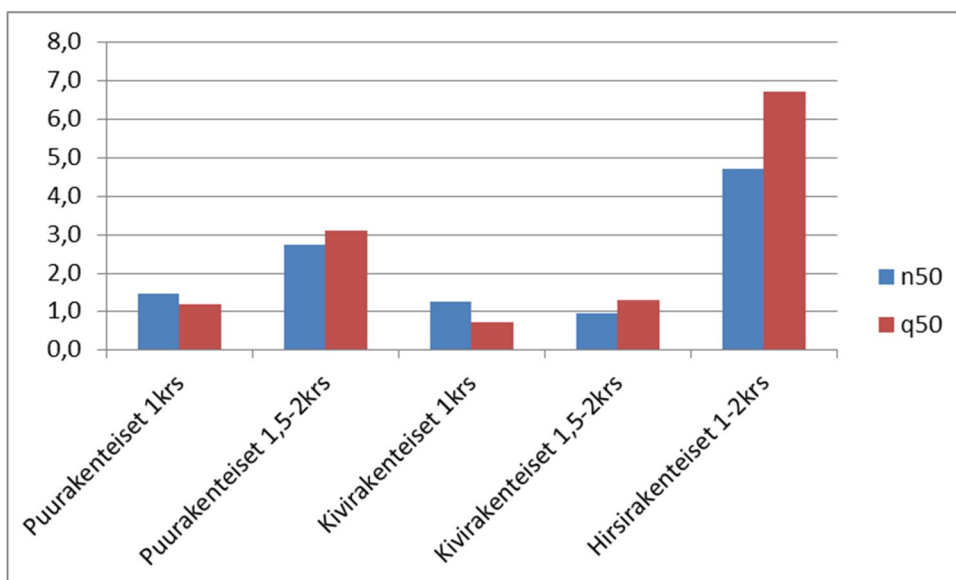
Ennen vuotta 2000 rakennetuista rakennuksista mukana oli 1950-luvun vaihteesta 1990-luvun loppuun valmistuneita rakennuksia. Tutkimuksessa olleet vanhimmat rakennukset eivät olleet mitenkään poikkeuksellisen huonoja muuhun ajanjakson (-1999) tutkimusmateriaaliin verrattuna. Kaikilta tutkimuksessa olleilta ajanjakson eri vuosikymmeniltä, ennen vuotta 2000 rakennetuista rakennuksista, löytyi hyvinkin huonoja ilmatiiviyksiä. Vasta 1990-luvun loppupuolella alkaa näkyä merkkejä ilmatiiviyden parantamisesta. Tämän aikakauden rakennusten ilmanvuotolukujen n₅₀ ja q₅₀ arvoissa on merkittävä ero. Sinänsä sillä ei ole merkitystä vanhan rakennuksen ilmatiiviyteen kummalla laskentatavalla ilmanvuotoluku esitetään. Yleisesti tämän aikakauden rakennusten ilmatiiviyden parantamisella on merkitystä rakennusten energiatehokkuuden kan-

nalta. Ilmatiiviyden parantaminen on yleensä myös kustannustehokas tapa säästää energian kulutuksessa.

Rakennusvuosien 2000 - 2009 aikana rakennetuissa pientaloissa ilmatiiviydet ovat parantuneet merkittävästi verrattuna aikaisempiin vuosikymmeniin. Varsinkin yksikerroksissa rakennuksissa päästään jo hyviin tuloksiin. Useampikerroksisissa rakennuksissa löytyy vielä aika paljon hajontaa. Tämä voi johtua mm. välipohjaliitosten vielä kehittymättömästä toteutuksesta ja joissakin tapauksessa kellarin huonosta ilmanpitävyydestä. Useampikerroksisten pientalojen ilmatiiviyys on vielä melko huonoa. Tämän aikakauden pientalojen ilmanvuotolukujen n_{50} ja q_{50} arvoissa ei ole merkittävää eroa.

Vuonna 2010 ja sitä uudemmat rakennukset ovat tutkimuksen mukaan vielä hieman tiiviimpiä kuin edellisen vuosikymmenen pientalot. Tämän ajanjakson useampikerroksiset pientalot ovat myös merkittävästi tiiviimpiä kuin vielä edellisellä vuosikymmenellä. Tämänkään aikakauden pientalojen ilmanvuotolukujen n_{50} ja q_{50} arvoissa ei ole merkittävää eroa. Tutkimusmateriaali painottuu tälle ajanjaksolle antaen kattavan tiedon uusimmasta pientalokannasta.

Tarkasteltaessa pientaloja rakennusmateriaalin mukaan tutkimuksessa on havaittavissa, että kivirunkoiset rakennukset ovat tiiviimpiä kuin puurunkoiset (kuva 26).



Kuva 26. Kuvaajassa on esitetty pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot runkomateriaalin ja kerrosten lukumäärän mukaan.

Kivirunkoisten pientalojen ilmanvuotoluvut ovat hyvää tasoa sekä yksi- että useampikerroksissa rakennuksissa. Tämä johtunee kivirakenteisten talojen välipohjarakenteen liitosten paikallavalutoteutuksesta. Ilmanvuotolukujen n_{50} ja q_{50} välillä ei ole merkittävää eroa kivirakenteisissa pientaloissa.

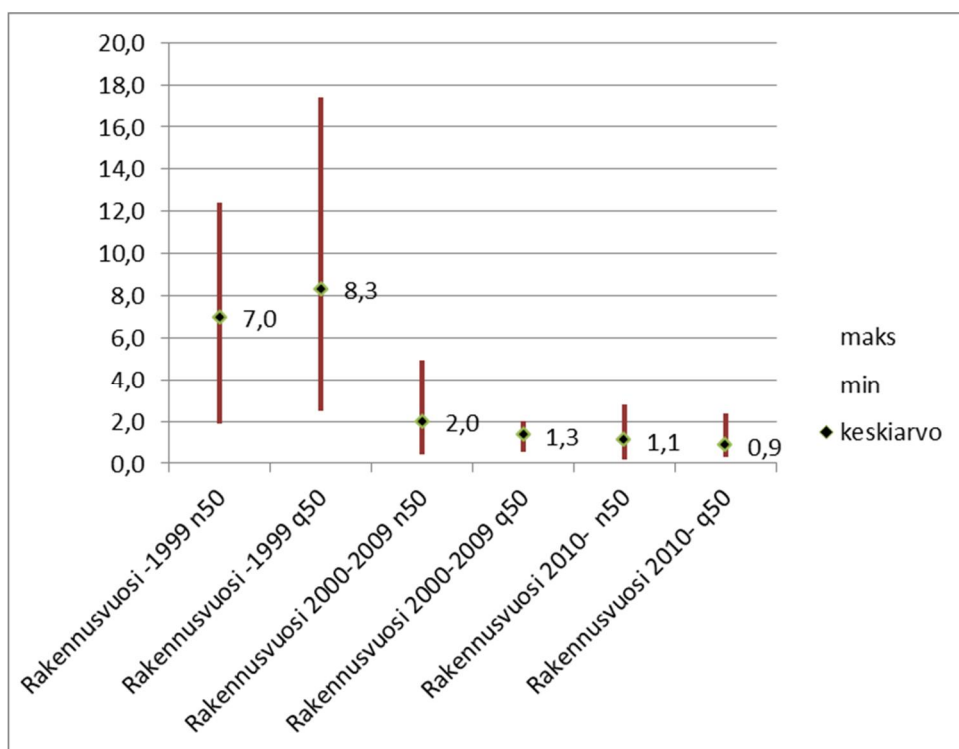
Puurakenteisten pientalojen osalta yksikerroksiset rakennukset ovat tutkimuksen perusteella jo melko hyvällä tasolla. Yleisesti ollaan ilmanvuotoluvun 1,0 ja 2,0 välillä. Useampikerroksisten puurunkoisten pientalojen ilmatiiviyksistä löytyy vielä melko suurta hajontaa. Ilmanvuotoluvut ovat keskimäärin tasolla $3,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Tutkimuksen perusteella uudemmassa 2010-luvulla rakennetussa rakennuskannassa on havaittavissa ilmatiiviyden paranemista myös useampikerroksisissa puurunkoisissa pientaloissa. Tämä johtunee siitä, että asiaan on kiinnitetty huomiota valvonnalla ja määräyksillä sekä yleisellä tiedottamisella, mutta myös työmaan tietotaito ja toteutustekniikat ovat kehittyneet. Ilmanvuotolukujen n_{50} ja q_{50} välillä ei ole merkittävää eroa puurakenteisissa pientaloissa.

Hirsirakennusten ilmatiiviyys on tutkitun materiaalin perusteella vielä erittäin huono. Tämä johtuu rakennusmateriaalin ominaisuuksista ja rakennusten toteutustekniikasta. Rakenteeseen ei tule erillistä ilmansulkukerrosta. Massiivipuu elää voimakkaasti aiheuttaen halkeilua ja rakoja. Hirsien liitoksista on erittäin vaikea tehdä ilmatiiviitä.

4.2 Puurunkoiset 1 krs pientalot

Tähän tutkimukseen saatiin yksikerroksisten puurunkoisten pientalojen mittaustuloksia erittäin kattavasti. Mitattuja rakennuksia oli 582, jakautuen rakennusvuosille 1950-2011. Rakennuksista kahdeksan oli rakennettu ennen vuotta 2000, 46 rakennusta 2000 - 2009 ja 528 rakennusta 2010 tai sitä myöhemmin.

Saatujen mittaustulosten perusteella kaikkien puurunkoisten yksikerroksisten pientalojen ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 1,6 1/h. Yksittäisten tulosten (n_{50}) vaihteluväli on maksimi 12,4 1/h ja minimi 0,2 1/h. Tutkimuksessa mukana olleiden rakennusten ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 1,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ vaihteluvälillä maksimi 17,4 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja minimi 0,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.



Kuva 27. Kuvaajassa on esitetty yksikerroksisten puurunkoisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot ja vaihteluvälit rakennusajankohdan mukaan.

Pientalojen ilmanvuotoluvut vaihtelevat hyvin paljon, mutta niiden n_{50} - ja q_{50} -luvut ovat yhtenevät. Suurimmat ilmanvuotolukujen arvot, eli epätiivimmät rakennukset, löytyvät tutkimusmateriaalin vanhemmista rakennuksista, mutta uudemmissakin on vaihtelua.

Ennen vuotta 2000 rakennetuissa yksikerroksisissa pientaloissa ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 7,0 1/h vaihdellen välillä 12,4 1/h ja 2,0 1/h. Vastaavasti ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 8,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ vaihdellen välillä 17,4 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 2,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Tiiviydeltään parhaat, tälle ajanjaksolle sijoittuvat rakennukset, löytyvät 1990-luvun lop-

pupuolelta. Kaikilta edeltäviltä vuosikymmeniltä, 1940-luvun lopulta 1980-luvun loppuun, löytyy tutkimusmateriaalista merkittävän huonoja ilmatiiviyksiä.

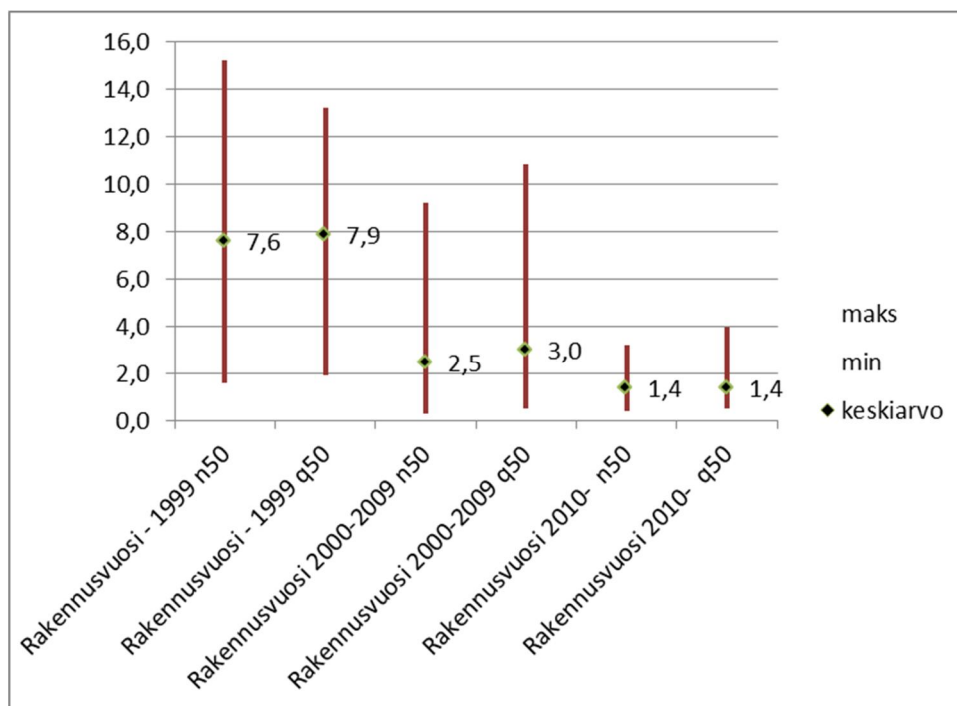
Vuosien 2000 - 2009 aikana rakennetuissa puurunkoisissa yksikerroksissa pientaloissa ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 2,0 1/h. Tutkimuksessa käytetyt n_{50} mittaustulokset vaihtelevat välillä 4,9 1/h ja 0,4 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 1,3 m³/(h m²), mittaustulosten vaihdellessa välillä 2,0 m³/(h m²) ja 0,5 m³/(h m²). Keskimääräiset tulokset ovat tämän ajanjakson rakennuksissa jo parantuneet merkittävästi aikaisempiin vuosiin verrattuna, mutta rakennuskannasta löytyy vielä myös melko huonoja yksittäisiä tiiviyksiä.

Uusimmissa, vuonna 2010 tai sen jälkeen rakennetuissa puurunkoisissa yksikerroksisissa pientaloissa, ilmanvuotoluku n_{50} on keskimäärin 1,1 1/h, yksittäisten arvojen vaihdellessa välillä 2,8 1/h ja 0,2 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo uusimmissa rakennuksissa on 0,9 m³/(h m²) yksittäisten arvojen vaihdellessa välillä 2,4 m³/(h m²) ja 0,3 m³/(h m²). Uusimpien yksikerroksisten puurunkoisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvo kertoo, että rakennuskannan vaipan ilmatiiviyys on parantunut huomattavasti ja alkaa olla jo kohtuullisen hyvällä tasolla. Tutkimuksessa käytettyjen mittaustulosten perusteella on kuitenkin näissäkin rakennuksissa melko huonoon tiivyyteen viittaavia yksittäisiä mittaustuloksia. Parhaat yksittäiset ilmanvuotoluvun q_{50} tulokset 0,3 m³/(h m²) osoittavat, että rakennuskannasta löytyy tosin erittäin tiiviitäkin rakennuksia.

4.3 Puurunkoiset 1,5- 2 krs ja kellarilliset pientalot

Puurunkoisissa useampikerroksissa pientaloissa, jotka käsittävät niin sanotut puolitoista- ja kaksikerroksiset, kellarilliset yksikerroksiset, kellarilliset puolitoista kerroksiset ja kellarilliset kaksikerroksiset, saatiin tutkimukseen mittaustuloksia 137:ta rakennuksesta. Rakennuksista viisitoista oli rakennettu ennen vuotta 2000, 22 rakennusta vuosien 2000- 2009 aikana ja loput 100 rakennusta vuonna 2010 tai myöhemmin.

Tutkimuksessa mukana olleiden rakennusten mittaustulosten perusteella useampikerroksisten puurunkoisten pientalojen ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 2,9 1/h. Yksittäiset mittaukset (n_{50}) vaihtelevat välillä 15,2 1/h ja 0,3 1/h. Rakennusten ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 3,4 m³/(h m²). Tulokset vaihtelevat välillä 13,2 m³/(h m²) ja 0,5 m³/(h m²).



Kuva 28. Kuvaajassa on esitetty puurakenteisten useampikerroksisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot ja vaihteluväli rakentamisajankohdan perusteella.

Ennen vuotta 2000 rakennetuissa useampikerroksisissa puurunkoisissa pientaloissa ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 7,6 1/h vaihdellen välillä 15,2 1/h ja 1,8 1/h. Vastavasti ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 7,9 $m^3/(h \cdot m^2)$ vaihdellen välillä 13,4 $m^3/(h \cdot m^2)$ ja 2,0 $m^3/(h \cdot m^2)$. Tiiviydeltään parhaat, tälle ajanjaksolle sijoittuvat rakennukset, löytyvät 1990-luvun loppupuolelta. Kaikilta edeltäviltä vuosikymmeniltä, 1940-luvun lopulta 1990-luvun loppuun, löytyy tutkimusmateriaalista merkittävän huonoja ilmatiiviyksiä. Parhaat tulokset ovat taas ajanjakson rakentamistapa ja tietotaso huomioiden melko hyvällä tasolla.

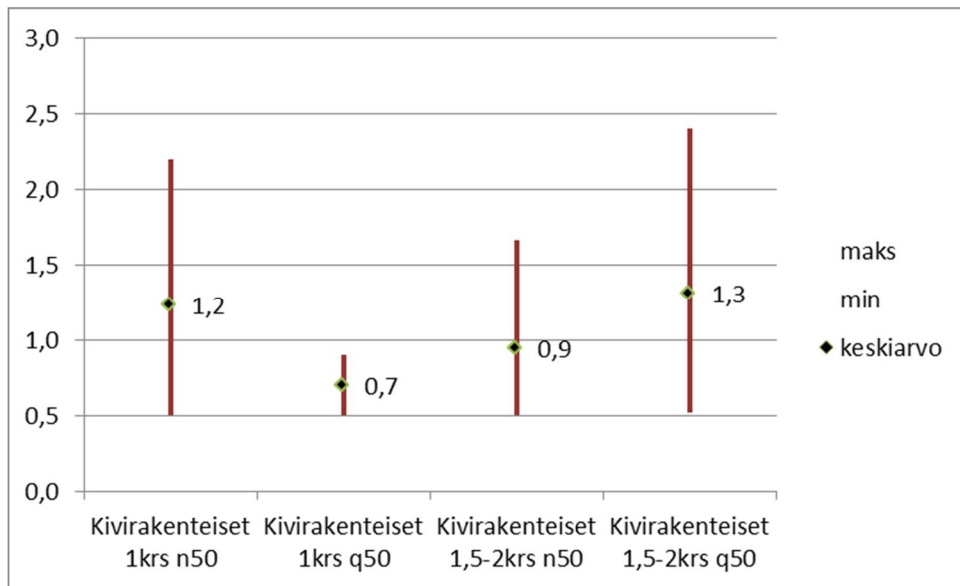
Vuosien 2000 - 2009 aikana rakennetuissa puurunkoisissa useampikerroksisissa pientaloissa ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 2,5 1/h. Tutkimuksessa käytetyt ilmanvuotoluvun n_{50} yksittäiset mittaustulokset vaihtelevat välillä 9,2 1/h ja 0,3 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 3,0 $m^3/(h \cdot m^2)$, mittaustulosten vaihdellella välillä 10,8 $m^3/(h \cdot m^2)$ ja 0,5 $m^3/(h \cdot m^2)$. Keskimääräiset tulokset ovat tämän ajanjakson rakennuksissa jo parantuneet merkittävästi aikaisempiin vuosiin verrattuna, mutta rakennuskannasta löytyy vielä myös erittäin huonoja yksittäisiä tiiviyksiä. Tulokset vaihtelevat todella paljon, olleen parhaimmillaan hyvää passiivitaloluokkaa. Huonoimmat tulokset ovat erittäin heikot aiheuttaen mitä suurimmalla todennäköisyydellä myös kosteusteknisiä ongelmia.

Vuonna 2010 tai sen jälkeen rakennetuissa puurunkoisissa useampikerroksisissa pientaloissa ilmanvuotoluku n_{50} on keskimäärin 1,4 1/h, yksittäisten arvojen vaihdella välillä 3,2 1/h ja 0,4 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo uusimmissa rakennuksissa on 1,4 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ yksittäisten arvojen vaihdella välillä 4,0 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 0,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Uusimpien useampikerroksisten puurunkoisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvo kertoo, että rakennuskannan vaipan ilmatiiviys on parantunut huomattavasti ja alkaa olla jo kohtuullisen hyvällä tasolla. Tutkimuksessa käytettyjen mittaustulosten perusteella on kuitenkin näissäkin rakennuksissa melko huonoon tiiviyteen viittaavia yksittäisiä mittaustuloksia. Parhaat yksittäiset ilmanvuotoluvun q_{50} tulokset 0,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ osoittavat, että rakennuskannasta löytyy tosin erittäin tiiviitäkin rakennuksia. Huonoimmat yksittäiset tutkimustulokset ovat kuitenkin erittäin huonoja, mikä osoittaa, että rakentamisen laatu ja laatutietoisuus vaihtelee erittäin paljon.

Tutkimustulosten perusteella useampikerroksiset puurunkoiset rakennukset ovat vaikeita toteuttaa ilmatiiviisti ja yksittäisistä mittaustuloksista löytyy huonoja ilmanvuotoluvun arvoja. Tämä tarkoittaa sitä, että jos haluamme kattavammin päästä rakentamismääräyskokoelman esittämään tavoitteeseen 2,0 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$, on uusiakin tämän tyyppin rakennuksia rakennettava huomattavasti paremmin.

4.4 Kivirunkoiset pientalot

Kivirunkoiset pientalot ovat yleisesti ilmatiiviydeltään hyviä. Tämä johtuu rakennusten toteutustavasta. Rakennukset tehdään pääsääntöisesti harkkorakenteisina betoniharkkotaloina, jotka ovat käytännössä paikallavalurakenteita.



Kuva 29. Kivirakenteisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot ja vaihteluvälit.

Kivirakenteisten yksikerroksisten pientalojen ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 1,2 1/h, yksittäisten mittaustulosten vaihdellessa välillä 2,2 1/h ja 0,9 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 0,7 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja mittaustulokset vaihtelevat välillä 0,9 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 0,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.

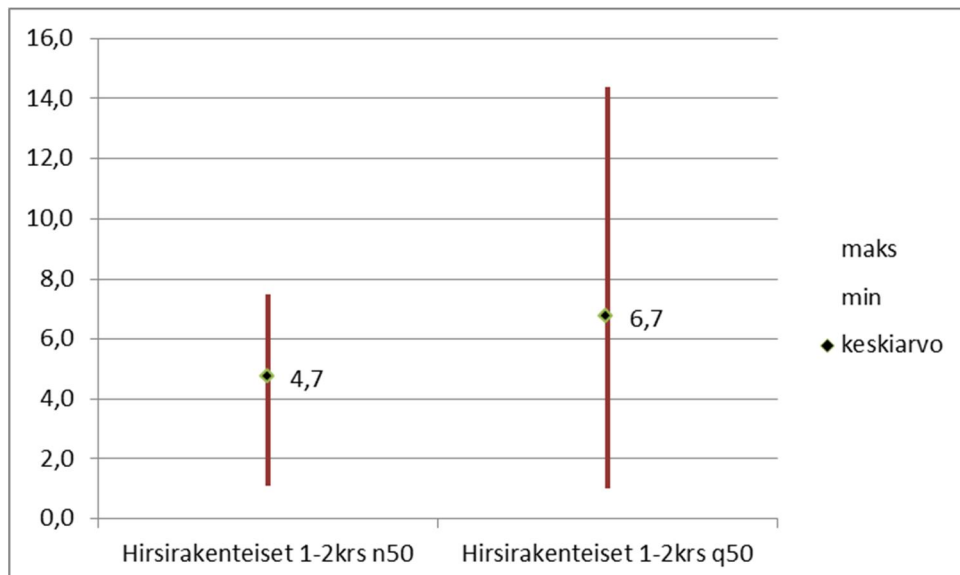
Useampikerroksisten kivirakenteisten pientalojen ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 0,9 1/h, yksittäisten tulosten vaihdellessa välillä 1,7 1/h ja 0,5 1/h. Ilmanvuotoluvun q_{50} keskiarvo on 1,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$, tulosten vaihdellessa välillä 2,4 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 0,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.

Tuloksista on nähtävissä, että kivirakenteiset pientalot ovat pääsääntöisesti ilmatiiviitä rakennuksia. Huonojen ilmanvuotolukujen syynä on yleensä huono liitos puurakenteeseen yläpohjaan. Liitoksen hyvä toteutus vaatii tietoa ja ammattitaitoa.

4.5 Hirsitalot

Hirsitalot ovat suomalaisen rakentamisen yksi perinteisimmistä rakenteen toteutustavoista. Rankarakenteinen runkoratkaisu on korvannut pääasiassa hirren käytön, mutta hirsirakentamisella on vieläkin oma asemansa suomalaisessa rakentamisessa. Massiivipuusta tehdyt hirsirunkoiset rakennukset ovat vaikeita toteuttaa ilmatiiviisti vaipan läpi menevien liitosrakenteiden takia. Sekä nurkkaliitoksia että hirsien välisiä liitoksia on käytännössä mahdoton toteuttaa täysin ilmatiiviisti.

Tutkimuksessa mukana olleiden hirsirunkoisten pientalojen ilmanvuotolukujen n_{50} keskiarvo on 4,7 1/h. Mittaustulokset vaihtelevat välillä 7,5 1/h ja 1,1 1/h. Ilmanvuotolukujen q_{50} keskiarvo hirsirunkoisilla pientaloilla on 6,7 m³/(h m²). Yksittäiset mittaustulokset vaihtelevat välillä 14,4 m³/(h m²) ja 1,0 m³/(h m²). Pienimmät ilmanvuotolukujen arvot selittyvät sillä, että kyseessä oli hirsirunkoinen rakennus, mutta rakennukseen oli asennettu sisäpuolinen lisäeristys ja yhtenäinen erillinen ilmansulkukerros. Tutkimuksessa mukana olleiden rakennusten, joiden vaipparakenteena on pelkkä hirsi, ilmanvuotolukujen keskiarvot ovat n_{50} 6,5 1/h ja q_{50} 9,6 m³/(h m²).



Kuva 30. Hirsirunkoisten pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot ja vaihteluvälit.

4.6 Kerrostalot

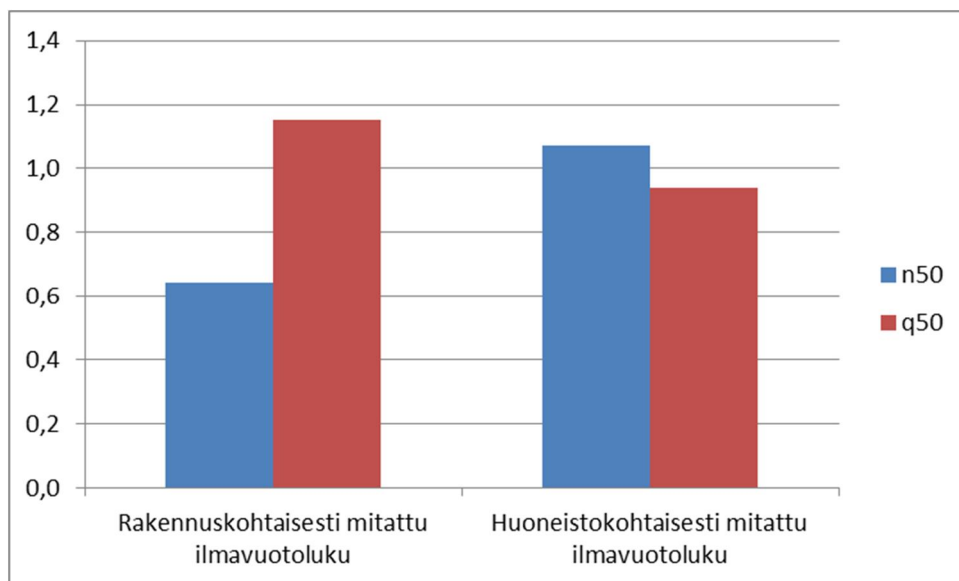
Kerrostalojenkin ilmapuotoluvuissa löytyy hajontaa, mutta erityisesti uudemmat rakennukset ovat yleisesti ilmatiiviitä. Betonirakenteiset kerrostalot on rakennusteknisen toteutuksensa ansiosta mahdollista saada hyvinkin tiiviiksi. Elementtirakenteisten rakennusten saumat ovat aina mahdollisia ilmapuotokohtia, mutta huolellisen saumavalun ja oikeiden materiaalivalintojen avulla betonielementtikerrostalotkin ovat yleisesti tiiviitä.

Tässä tutkimuksessa oli mukana mittaustuloksia 116 eri kohteesta. Rakennusvuosilta rakennukset sijoituivat vuosille 1928 - 2012. Koko rakennuksessa suoritettuja mittaus-tuloksia on 52 ja huoneistokohtaisia tuloksia 64.

Rakentamismääräyskokoelma antaa mahdollisuuden mitata kerrostalojen ilmanvuoto-luku joko koko rakennusta käsittävänä mittauksena tai huoneistokohtaisena mittaukse-na [RakMk D3 2012: 10].

Mitattaessa rakennuskohtaisesti ilmanvuotoluvun q_{50} -arvoa, rakennuksen vuotoilma-määrä jaetaan koko rakennuksen ulkovaipan pinta-alalla.

Huoneistokohtaisessa mittauksessa mitataan 20 % koko rakennuksen huoneistojen lukumäärästä. Suorittaessa vaipan ilmatiiviyyden mittaaminen huoneistokohtaisesti, lasketaan vaippaan huoneiston rajoittavat rakennusosat ja näistä kertyneellä pinta-alalla jaetaan vuotoilmamäärä. Näitä ovat ulkoseinä, huoneiston muihin ympäröiviin tiloihin kuten porrashuoneeseen ja viereisiin asuntoihin rajoittuvat väliseinät sekä lattia ja katto. Huoneistokohtaisessa mittauksessa suurin osa vaipasta on muuta kuin ulko-vaippaa, jonka tiiviyttä ollaan tarkastelemassa. Tällä tavalla mitattaessa vaipan suhteel-linen pinta-ala tulee huomattavan suureksi eikä anna oikeaa kuvaa rakennuksen ulko-vaipan ilmanpitävyydestä.



Kuva 31. Kerrostalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot esitettynä sekä rakennus- että huoneistokohtaisesti mitattuina. Huomioitava asia on, että rakennus- ja huoneistokohtaiset mittaukset on suoritettu eri rakennuksissa.

Kerrostalojen rakennuskohtaisten mittausten ilmanvuotolukujen n_{50} keskiarvo on 0,6 1/h, tulosten vaihdella välillä 1,2 1/h ja 0,2 1/h. Ilmanvuotolukujen q_{50} keskiarvo on 1,2 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Yksittäiset tulokset vaihtelevat välillä 2,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 0,5 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.

Huoneistokohtaisten mittaustulosten ilmanvuotolukujen n_{50} keskiarvo on 1,7 1/h, yksittäisten tulosten vaihdella välillä 7,3 1/h ja 0,3 1/h. Ilmanvuotolukujen q_{50} huoneistokohtainen keskiarvo on 1,1 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$. Yksittäiset mittaustulokset vaihtelevat välillä 5,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ ja 0,3 $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.

Kuvassa 31 esitetyt tulokset rakennus- ja huoneistokohtaisen mittaustavan välillä eivät anna täysin oikeaa kuvaa, koska mittaukset on tehty eri rakennuksissa, mutta oikeasuuntaisen käsityksen siitä kuitenkin saa. Kuvassa 32 on esitetty mittaustulokset samassa rakennuksessa suoritetusta vaipan ilmatiivyyden mittauksesta molemmilla sallituilla menetelmillä.

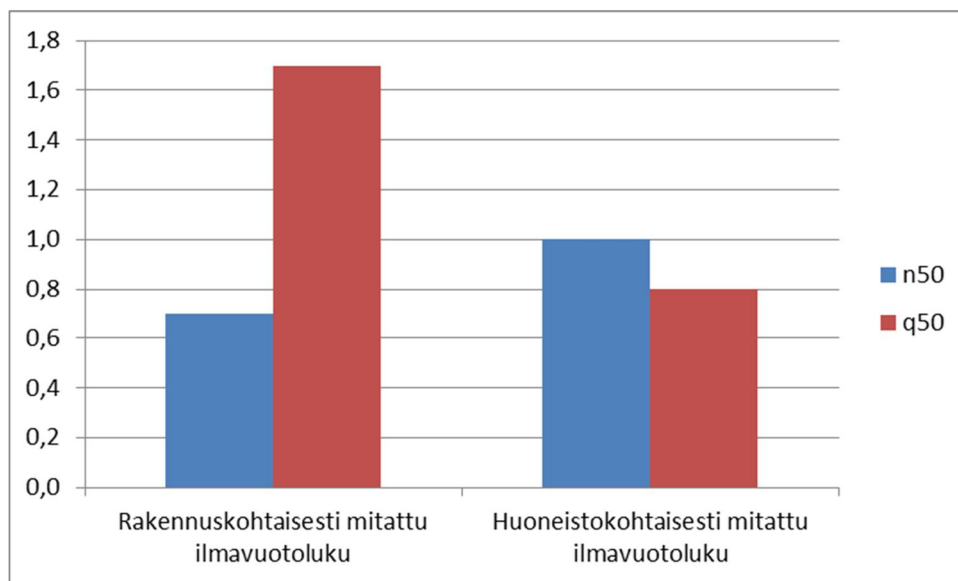
Tutkimuksen tuloksista voidaan huomata, että on merkittävä ero miten mittaus suoritetaan. Kun aikaisemmin käytettiin ilmanvuotolukua n_{50} , jolloin rakennuksen ilmatilavuus on vuotoilmamäärän jakajana, saatiin parempia tuloksia kun mitattiin koko rakennus. Nyt, kun käytetään ilmanvuotolukua q_{50} ja vuotoilmamäärän jakajana on vaipan pinta-ala, saadaan vastaavasti parempia lukuarvollisia tuloksia tekemällä kerrostalojen ilma-

tiiviyden mittaukset huoneistokohtaisesti, mutta rakennuksen ulkovaipan tiiviys ei tällä menetelmällä parane.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kun kerrostalon vaipan ilmatiiviyden mittaaminen suoritetaan koko rakennuksen käsittävänä mittauksena, parantaa nykyinen ilmanvuotoluvun q_{50} laskentatapa kerrostalojen ilmatiiviyttä uusissa rakennuksissa. Itse lukuarvo ei paranna eikä heikennä ilmatiiviyttä, mutta jos halutaan päästä samoihin ilmanvuotolukujen arvoihin kuin aikaisemmin, on rakennettava suuret rakennukset huomattavasti tiiviimmiksi.

4.7 Kerrostalon mittaaminen eri menetelmillä

Alla olevassa kuvassa 32 on esitetty kerrostalon vaipan ilmatiiviyden mittaustulokset molemmilla sallituilla mittaustavoilla mitattuna samassa rakennuksessa.

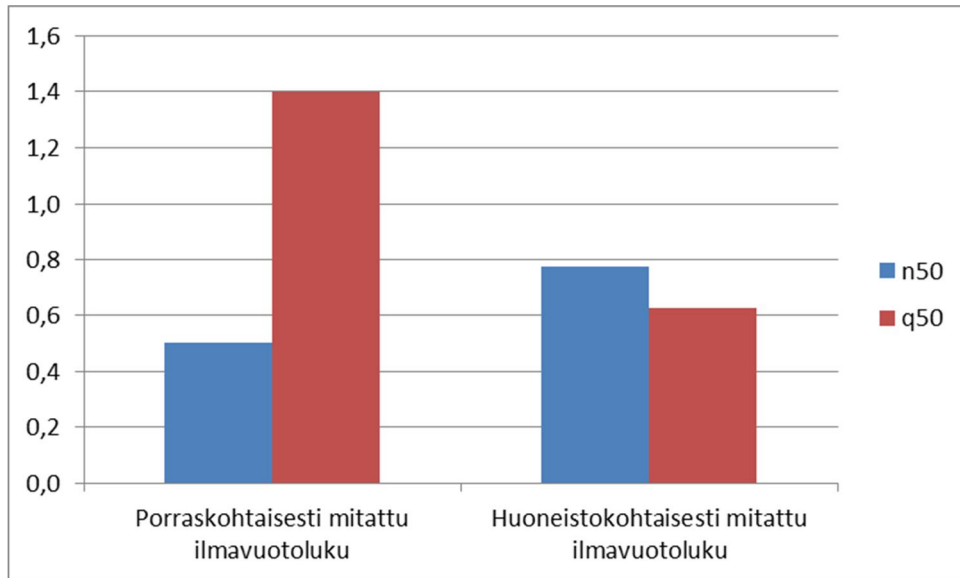


Kuva 32. Kuvaajassa on esitetty kerrostalon ilmavuotoluvut sekä asunto- että rakennuskohtaisesti mitattuna.

Kuvassa 32 on esitetty samassa tutkimuskohteessa suoritetusta kerrostalon vaipan ilmatiiviyden mittaamisesta saadut ilmavuotoluvut. Verrattaessa nykyisten rakentamismääräysten mukaisia q_{50} ilmanvuotolukujen arvoja voidaan havaita, että ero on merkittävän suuri. Rakennuskohtaisesti mitattu ilmavuotoluku q_{50} on $1,7 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ja asuntokohtaisesti mitattu $0,8 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Tämä johtuu pääsääntöisesti siitä, että huoneistokohtaisessa mittauksessa tulee suhteellisesti erittäin paljon vaipan pinta-alaa verrattuna rakennuskohtaiseen mittaukseen.

Rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvulla tarkoitetaan sisä- ja ulkotilojen, eli lämpimien ja kylmien tilojen, välistä rakennusosan tiiviyyttä. Ainoastaan kerrostalojen rakennuskoh-
taisella mittaamisella tämä arvo voidaan osoittaa luotettavasti.

Aina ei ole mahdollista suorittaa kerrostalossa koko rakennusta käsittävää vaipan ilma-
tiivyyden mittaamista. Alla olevassa kuvassa 33 on esitetty samassa kohteessa suorite-
tusta porraskohtaisesta ja huoneisto-kohtaisesta mittauksesta määritetyt ilmavuotoluvut.

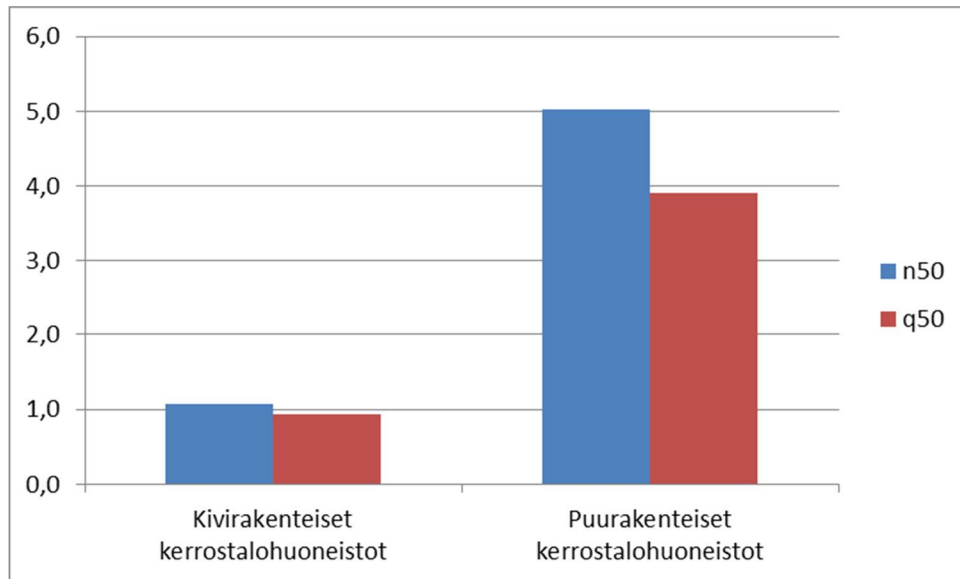


Kuva 33. Kaaviossa on esitetty kerrostalon ilmavuotoluvut samasta kohteesta mitattuna porraskohtaisena ja huoneistokohtaisena mittauksena.

Kuten kuvista 32 ja 33 nähdään, tulokset ovat hyvin yhteneväiset. Ilmanvuotolukujen q_{50} arvot porrashuonekohtaisesti mitattuna on $1,4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ja huoneistokohtaisesti mitattuna on $0,6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Lukuarvojen ero on huomattava. Porrashuonekohtaisessa mittauksessa saadaan myös huomattavasti luotettavampi tieto ulkovaipan tiiviyydestä kuin huoneistokohtaisella mittauksella.

4.8 Kivi- ja puurakenteisten kerrostalojen ilmatiiviys

Tutkimuksessa kerätystä aineistosta kerrostalojen huoneistokohtaisesta tutkimusmateriaalista voitiin verrata myös kivi- ja puurakenteisten kerrostalohuoneistojen tiiviyseroja. Kivirakenteiset kerrostalohuoneistot oli rakennettu vuosina 1928 - 2011 ja puurakenteiset vuosina 1998 - 2011. Mittaustuloksia oli saatu 55:tä eri kohteesta.



Kuva 34. Kuvaajassa on esitetty kivi- ja puurakenteisten kerrostalohuoneistojen ilmanvuotolukujen keskiarvot.

Tutkimuksen perusteella kivirakenteisten kerrostalohuoneistojen ilmanvuotoluku n_{50} on 1,0 1/h. Yksittäiset tulokset vaihtelevat välillä 2,6 1/h ja 0,3 1/h. Ilmanvuotoluku q_{50} on 0,9 m³/(h m²), yksittäisten tulosten vaihdella välillä 1,9 m³/(h m²) ja 0,3 m³/(h m²). Yksittäisissä mittaustuloksissa ei ole suurta eroa sillä, että sijoittuuko rakennus ajanjakson (1928 - 2012) alkuun vai loppuun, mutta pientä tulosten paranemista on havaittavissa uusimmissa kerrostaloissa. Huoneistokohtaisella mittauksella kerrostalot saadaan näyttämään erittäin tiiviltä.

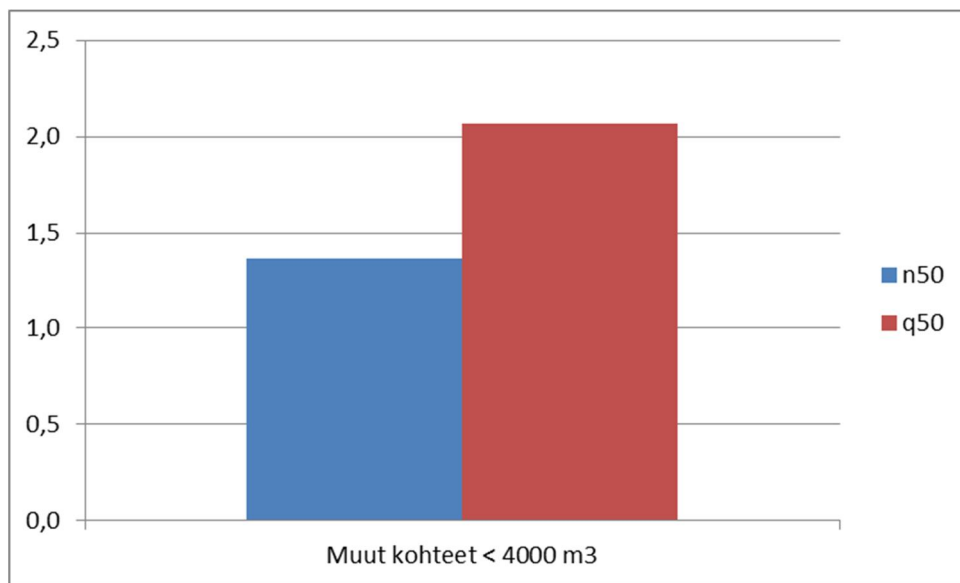
Puurakenteisten kerrostalohuoneistojen ilmanvuotoluku n_{50} on tutkimuksen perusteella 5,0 1/h. Yksittäiset tulokset vaihtelevat välillä 7,3 1/h ja 3,0 1/h. Ilmanvuotoluku q_{50} on puukerrostaloissa 3,9 m³/(h m²), yksittäisten tulosten vaihdella välillä 5,3 m³/(h m²) ja 2,4 m³/(h m²). Tulokset ovat melko yhteneväiset koko tutkitun ajanjakson (1998 - 2011) rakennuksissa. Hajontaa löytyy sekä vanhoista että uusista puukerrostalohuoneistoista. Huoneistokohtaisessa mittauksessa myös huoneiston rajoittavien väliseinien

tiiviyys vaikuttaa merkittävästi tulokseen. Puurakenteissa hyvän tiiviyden toteuttaminen vaatii erityistä huolellisuutta ja ammattitaitoa.

4.9 Muut rakennukset

Tutkimuksessa käsitellyt muut kuin asuinrakennukset ovat teollisuus-, koulu-, myymälä-, varasto- ja liikerakennuksia. Rakennukset on jaoteltu kahteen ryhmään, alle 4000 m³ ja yli 4000 m³ kohteisiin, rakennusten ilmatilavuuden perusteella. Rakennukset on rakennettu vuosina 2004 - 2012.

Teollisuushallit ja vastaavat suuret rakennukset ovat aikaisemmin näyttäneet tiiviyksmitustulosten perusteella tiiviiltä rakennuksilta. Tähän on osittain vaikuttanut rakennusten suuri ilmatilavuus, joka varsinkin korkeissa kohteissa on parantanut tuloksia.

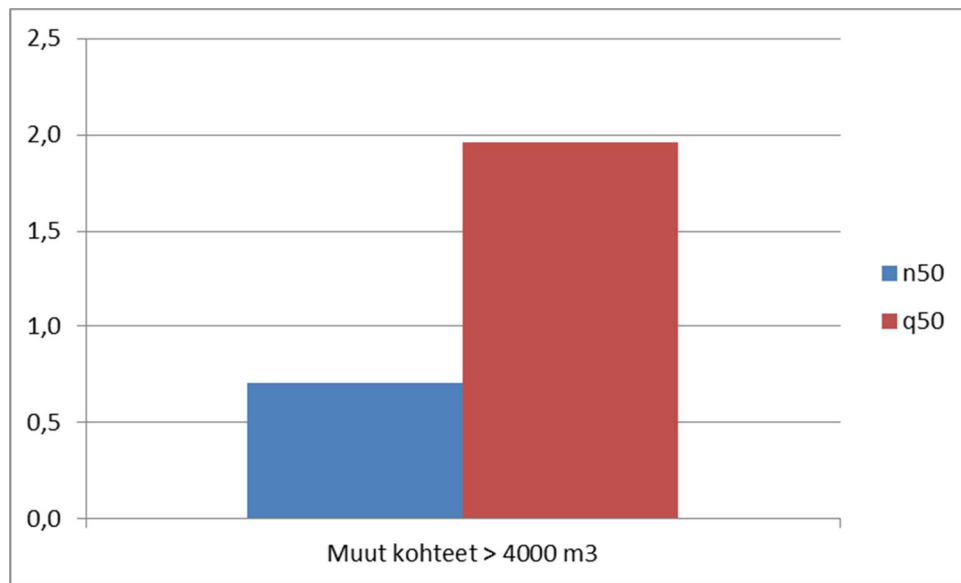


Kuva 35. Teollisuushallit, koulut, myymälät, liike- ja varstorakennukset, joiden ilmatilavuus on alle 4000m³.

Tutkimuksen perusteella ilmatilavuudeltaan alle 4000 m³ muiden kuin asuinrakennusten ilmanvuotoluku n₅₀ on 1,4 1/h. Yksittäiset tulokset vaihtelevat välillä 2,7 1/h ja 0,3 1/h. Ilmanvuotoluku q₅₀ on 2,1 m³/(h m²), yksittäisten tulosten vaihdella välillä 4,9 m³/(h m²) ja 0,3 m³/(h m²).

Kuten tutkimuksen tuloksista nähdään, ilmanvuotoluvun mittaustavalla on merkitystä rakennuksen ilmanvuotolukuun ja sen seurauksena vaipan ilmatiivyyteen.

Ilmatilavuudeltaan suurempien, yli 4000 m³, rakennusten ilmatiivyyteen ilmanvuotoluvun laskentatavan muutoksella on vieläkin suurempi merkitys (kuva 36).



Kuva 36. Teollisuushallit, koulut, myymälät, varasto- ja liikerakennukset, joiden tilavuus on yli 4000 m³

Tutkimuksen perusteella ilmatilavuudeltaan alle 4000 m³ muiden kuin asuinrakennusten ilmanvuotoluku n₅₀ on 0,7 1/h. Yksittäiset tulokset vaihtelevat välillä 1,6 1/h ja 0,2 1/h. Ilmanvuotoluku q₅₀ on 2,0 m³/(h m²), yksittäisten tulosten vaihdella välillä 3,6 m³/(h m²) ja 0,7 m³/(h m²). Aikaisemmin käytetyllä ilmanvuotoluvulla n₅₀ arvioituna nämä suuret rakennukset ovat erittäin ilmatiiviitä. Tämä johtuu rakennusten suuresta ilmatilavuudesta, joka oli aikaisemmin vuotoilmanmäärän jakajana laskettaessa n₅₀-lukua. Nyt, kun määräysten mukaan vuotoilma jaetaan vaipan pinta-alalla, on suuret rakennukset rakennettava huomattavasti tiiviimmiksi, että voidaan saavuttaa aikaisempi ilmanvuotoluvun taso.

5 Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin, onko vuonna 2012 voimaan tulleen rakentamismääräyskokoelmassa (RakMk D3 2012) määritetyn ilmanvuotoluvun laskentatavan muutoksella vaikutusta uusien rakennusten vaipan ilmatiivyyteen ja sen seurauksena rakennusten energiatehokkuuteen.

Ilmanvuotoluku lukuarvona ei tee mistään rakennuksesta tiiviimpää tai harvempaa, mutta tutkimuksessa selvitettiin joudutaanko rakennuksista tekemään tiiviimpiä, että saavutettaisiin myös uudella laskutavalla vaadittu ilmanvuotoluvun arvo.

Tutkimuksessa selvitettiin myös, mitä vaikutusta on kerrostalojen ilmanvuotoluvun kahdella eri mittaustavalla. Rakentamismääräyskokoelma antaa mahdollisuuden mitata kerrostalojen ilmatiiviyys joko huoneistokohtaisena mittauksena, jolloin 20 % huoneistojen lukumäärästä on mitattava, tai koko talon käsittävän mittauksena. Näiden kahden mittaustavan lopputuloksissa on merkittävä ero.

5.1 Pientalot

Pientalojen osalta tämän tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että ilmanvuotoluvun laskentaperusteen muutoksella ei ole merkittävää vaikutusta uusien rakennusten ilmatiivyyteen ja energiatehokkuuteen. Pientalot ovat pääsääntöisesti kokoluokaltaan sen suuruisia, että molemmat laskentatavat antavat suuruusluokaltaan saman ilmanvuotoluvun. Rakennuskannassa on tosin ilmatilavuudeltaan erittäin suuria pientaloja, joiden ulkovaippa joudutaan tekemään tiiviimmäksi käytettäessä nykyistä ilmanvuotoluvun laskentamenetelmää. Laskentatavan muutoksella on näin ollen pieni parantava vaikutus pientalojen ilmatiivyyteen.

Laskentatavan muutos ei sinänsä merkitse mitään vanhojen rakennusten vaipparakenteen tiivyyteen. Vaippa on edelleen yhtä harva tai tiivis, riippumatta mitatusta lukuarvosta. Vanhemmassa pientalorakennuskannassa on mahdollista saada huomattavia säästöjä energiankulutuksessa parantamalla rakennusten ilmatiiviyttä. Tämä on usein myös erittäin kustannustehokas tapa. Tampereen teknillisen yliopiston tutkimuksen mukaan pientaloissa on mahdollista saavuttaa jopa seitsemän prosentin säästöt energiankulutuksessa jokaista ilmanvuotoluvun yksikköä kohti. Vanhemmissa, ennen vuotta 2000

rakennetuissa pientaloissa, ilmanvuotoluvun yksikkö on noin $8,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Tässä on varmasti huomattavaa pienentämismahdollisuutta.

5.2 Kerrostalot

Kerrostalojen osalta tilanne on mielenkiintoinen. Jos haluamme todella mitata energiatehokkuuteen vaikuttavaa ulkovaipan tiiviyyttä, on kerrostalojen mittaaminen suoritettava aina joko porraskohtaisena tai koko talon käsittävänä mittauksena. Näin mitattuna laskentatavan muutoksella on merkittävä vaikutus. Tutkimuksen perusteella kerrostalojen rakennuskohtaisesti mitattu ilmanvuotoluku n_{50} on $0,6 \text{ 1/h}$ ja vastaava q_{50} on $1,2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Tämä tarkoittaa sitä, että on rakennettava huomattavasti tiiviimpiä vaipparakenteita, että päästään myös uusien määräysten vaatimalla q_{50} arvolla vanhojen n_{50} arvojen tasolle. Kerrostalojen osalta ilmanvuotoluvun laskentatavan muutoksella on ilmatiiviyttä ja energiatehokkuutta parantava vaikutus.

Jos halutaan kikkailla pelkillä lukuarvoilla, niin silloin voidaan mitata asuntokohtaisia mittauksia. Tällöin saadaan huonostikin ilmaa pitävistä rakennuksista lukuarvillisesti hyviä, kuten kerrostalojen asuntokohtainen ilmanvuotoluku $0,9 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ osoittaa.

Huoneistokohtainen tiiviysmittaus on hyvä silloin, kun halutaan varmistua huoneistojen muihin tiloihin rajoittuvien rakenteiden tiiviyydestä. Huoneistokohtaista mittausta ei pitäisi tehdä, kun selvitetään rakennuksen ilmanvuotolukua, vaikka rakentamismääräyskoelma antaakin siihen mahdollisuuden.

5.3 Muut rakennukset

Tutkimuksessa käsitellyt muut kuin asuinrakennukset ovat teollisuus-, koulu-, myymälä-, varasto- ja liikerakennuksia. Tämä rakennusryhmä on näyttänyt aikaisemmin käytetyn ilmanvuotoluvun n_{50} perusteella erittäin ilmatiiviin vaipparakenteen omaavalta rakennuskokonaisuudelta.

Teollisuusrakennusten ja -hallien ilmanpitävyyteen laskentatavan muutoksella on myös suuri vaikutus. Hallit ovat yleisesti ilmatilavuudeltaan suuria korkeita rakennuksia, joita vanha laskentamalli suosi.

Tämä on johtunut siitä, että rakennuksissa on ollut suuret ilmatilavuudet. Rakennuksen ilmanvuotoluvun lukuarvoa on voitu parantaa huomattavasti suunnittelemalla neljä metriä korkeasta rakennuksesta kuusi- tai kahdeksan metriä korkea. Rakennuksessa on ollut edelleen yhtä monta vaipparakenteen epäjatkuvuuskohtaa; ikkunaa, nurkkaa, katolle menevää hormia, jotka ovat voineet vuotaa yhtä paljon kuin matalammassakin rakennuksessa.

Nyt, kun vuotoilman jakajana käytetään vaipan pinta-alaa, ei vastaavaa epäkohtaa enää pääse syntyään. Nykyinen ilmanvuotoluvun laskentaperuste antaa tasapuolisemman kuvan rakennusten ilmatiivyydestä riippumatta rakennusten koosta.

Tutkimuksen perusteella uusi laskentatapa vaikuttaa suurissa rakennuksissa sen, että jos halutaan ilmanvuotolukujen lukuarvot säilyttää samoina kuin aikaisemmin, on rakennukset rakennettava huomattavasti tiiviimmiksi. Aikaisemmin käytetyn n_{50} -luvun arvo yli 4000 m³ rakennuksissa on 0,7 1/h ja nykymääräysten mukainen q_{50} on 2,0 m³/(h m²). Rakennukset on rakennettava erittäin paljon tiiviimmiksi, että saavutettaisiin aikaisempi taso ilmanvuotoluvun arvoissa.

Vaipan ilmatiivyyden vaikutus rakennuksen energiankulutukseen

Vaipparakenteiden kautta kulkeutuvan vuotoilman lämmitykseen tarvittavan energian laskemiseen tarvitaan kolme kaavaa, jotka ovat esitetty Suomen Rakennusmääräyskoelmissa D3 2012. Laskennan lähtötietoina tarvitaan kohteen ilmanvuotoluku q_{50} , vaipan pinta-ala ja paikkakunnan lämmöntarveluku / astepäiväluku sekä tarkastelujakson pituus.

Rakenteiden epätiivyyksien kautta sisään ja ulos virtaavan vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia $Q_{\text{vuotoilma}}$ lasketaan kaavalla 11.

$$Q_{\text{vuotoilma}} = H_{\text{vuotoilma}} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (11)$$

jossa,	$Q_{\text{vuotoilma}}$	vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia, kWh
	$H_{\text{vuotoilma}}$	vuotoilman ominaislämpöhäviö, W/K
	T_s	sisäilman lämpötila, °C
	T_u	ulkoilman lämpötila, °C
	Δt	ajanjakson pituus, h

1000 kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Vuotoilman ominaislämpöhäviö $H_{\text{vuotoilma}}$ lasketaan kaavalla 12.

$$H_{\text{vuotoilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v, \text{vuotoilma}} \quad (12)$$

jossa,

$H_{\text{vuotoilma}}$	vuotoilman ominaislämpöhäviö, W/K
ρ_i	ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
C_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 Ws/(kgK)
$q_{v, \text{vuotoilma}}$	vuotoilmavirta, m ³ /s

Vuotoilman vuotoilmavirta q_v lasketaan kaavalla 13.

$$q_{v, \text{vuotoilma}} \text{ m}^3/\text{s} = (q_{50} / 3600 * X) * A_{\text{vaippa}} \quad (13)$$

jossa, X = kerroin :

- 1-kerroksinen 35,
- 2-kerroksinen 24,
- 3-4-kerroksinen 20,
- 5 ja sitä korkeammille 15.

X-kerroin perustuu kenttäkokeiden tuloksiin. Kertoimella muutetaan 50 Pa paine-erolla tapahtuva ilmapuotomäärä vastaamaan normaalia käyttötilanteen paine-eron ilmapuotomäärää.

Tässä esitetään esimerkkilaskelma Rovaniemelle rakennettavan sähkölämmitteisen teollisuushallin tarvitsema vuotoilman energiantarve seuraavilla lähtötiedoilla:

$q_{50} = 4$
 $A_{\text{vaippa}} = 1000 \text{ m}^2$
 Energian hinta = 0,13 €/kWh
 Hallin korkeus vastaa 3- 4 kerroksista rakennusta
 $q_{v, \text{vuotoilma}} \text{ (m}^3/\text{s)} = (4 / 3600 * 20) * 1000 = 0,0556 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H_{\text{vuotoilma}} = 1,2 * 1000 * 0,0556 \text{ m}^3/\text{s} = 66,67 \text{ W/K}$
 $Q_{\text{vuotoilma}} = 66,67 \text{ W/K} * 6000 \text{ vrkK} * 24 \text{ h} / 1000 = 9600 \text{ kWh/v}$
 Kulutus: $96000 \text{ kWh/v} * 0,13 \text{ €/kWh} = 1248 \text{ €}$

Jos vaipan ilmanvuotoluku kyseisessä hallissa olisi 1 ($q_{50}= 1$), vastaavasti energiankulutus olisi neljäsosa eli 312 €.

Edellä esitetystä laskelmasta on havaittavissa, että rakennuksen vaipan ilmatiiviydellä on oleellinen merkitys rakennuksen energian kulutukseen.

On muistettava, että rakennuksen ilmanvuotoluku ei selitä pelkästään rakennusten vuotoilmanvaihdosta johtuvaa ylimääräistä energiankulutusta, koska joidenkin rakennusten ilmavuotokäyrät ns. normaalisti esiintyvien paine-erojen alueella (0 – 10...15 Pa) saattavat poiketa toisistaan, vaikka ilmavuotoluvut n_{50} olisivatkin samat. Ilmanpitävyys on vain yksi energiantehokkuuteen vaikuttava tekijä. Rakennuksen vaipan, taloteknisten järjestelmien, sääolosuhteiden ja käytön yhteisvaikutus ja järjestelmien yhteen sovittaminen määrää lopulta rakennuksen toimivuuden. Edellä esitetty laskelma antaa kuitenkin riittävän tarkkoja tietoja suuntaa-antaviin laskelmiin ja eri ilmanvuotolukujen vaikutuksesta energiakulutukseen. [Paloniitty 2012.]

Lähteet

Aho Hanna ja Korpi Minna, 2009. Ilmanpitävien rakenteiden liitosten toteutus asuinrakennuksessa, Tutkimusraportti, Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere

Asumisterveysohje, 2003. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki

Björkholtz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. Helsinki

Immonen, Markus. 2008. Opinnäytetyö. Helsinki

Kauppinen, Timo ja Paloniitty, Sauli. 2006. Rakennusten lämpökuvaus. Jyväskylä: Rakennusteollisuuden kustannus Oy

Konvektio 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Konvektio>> Luettu 8.11.2013

Paloniitty, Sauli. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki: Suomen rakennus-media

Pekkonen, Juhani. 2007. Luentomateriaali. Helsingin ammattikorkeakoulu.

Rakennusten lämpökuvaus. 2005. Suunnitteluohje 1213-S Ratu.

Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. RIL 107-2012. Suomen Rakennusinsinöörien liitto. Helsinki

Siikanen, Unto. 1996. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto

Suomen rakentamismääräyskokoelma C2. 1998. Kosteus

Suomen rakentamismääräyskokoelma D2. 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. 2012. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.

Tasauslaskentaopas. 2012. Rakennusten lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen. Ympäristöministeriö.

Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). 2000. SFS-EN 13829 2000. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. 2009. RT 80-10974.

Tiivistalo. 2013. Verkkodokumentti. < www.tiivistalo.fi > Luettu 20.11.2013

Toimivat katot. 2013. Kattoliitto ry. Sastamala

Vinha, Juha, Korpi, Minna. ym. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilma-
to ja energiatalous. Tutkimusraportti 140. Tampereen teknillinen yliopisto, Ra-
kennustekniikan laitos.

