

Rakennusten ilmatiiviysmittausten kehitys

Mia Maula

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Maula, Mia	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä toukokuu 2018
	Sivumäärä 81	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Rakennusten ilmatiiviysmittausten kehitys		
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Korpinen Jussi, Viinikainen Marko		
Toimeksiantaja(t) Inmeco Oy, Pasi Korhonen		
Tiivistelmä <p>Tutkimuksen tilaajan toimi Inmeco Oy. Kyseessä on Jyväskyläläinen rakennusconsulttitoiminnan yritys, jonka liiketoiminnan yksi osa-alue ovat ilmatiiviysmittaukset.</p> <p>Tavoitteena oli selvittää tutkimuksen tilaajalle, onko heidän tekemissään ilmatiiviysmittauksissa ilmanvuotoluvussa tapahtunut kehitystä ja miten ilmanvuotokohtat ovat kehittyneet 2010-luvulta tähän päivään. Etenkin pientalojen suhteen haluttiin tehdä vertailua tilaajan kanssa yhteistyötä tekevien yritysten välillä. Haluttiin myös selvittää ilmanvuotoluvun erot eri rakennustyyppien välillä ja tarkastella elementtirakentamisen ja paikalla rakennetun rakennuksen eroavaisuuksia. Lisäksi kaikkien rakennustyyppien kohdalla selvitettiin ilmanvuotokohtien vertailua ja tutkittiin, ovatko vuotokohtat muuttuneet tai kehittyneet vuosien varrella.</p> <p>Tutkimus aloitettiin perehtymällä rakentamismääräyksiin, rakennusfysikaalisiin ilmiöihin, ilmatiiviysmittauksen perusteisiin sekä rakennusvaipan ilmapuotokohtien paikannusmenetelmiin. Tutkimuksessa keskeisenä asiana oli myös perehtyä rakennusten energiatehokkuuteen ja sisäilmastoon. Tutkimusta varten kerättiin tietoa tutkimuksen tilaajan tekemistä ilmatiiviysraporteista. Tutkimuksessa käytettäviä raportteja oli yhteensä 72, käsittäen 45 omakotitaloa, 17 kerrostaloa ja 10 rivitaloa. Kaikki tutkimuksessa olevat raportit käytiin läpi ja niistä koottiin Excel-taulukko, johon syötettiin halutut tiedot rakennuksista. Tämän jälkeen taulukoista muotoiltiin kaavioita, joista pystyttiin helposti analysoimaan rakennusten ilmanvuotolukuja.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena havainnoitiin, että kehitystä on tapahtunut kaikilla rakennustyypeillä. Rakentamistavalla ja rakennuksen toteuttavalla yrityksellä on suuri merkitys rakennusten ilmatiiviuden kannalta.</p>		
Avainsanat (<u>asiasanat</u>) Tiiviysmittaus, energiatehokkuus, ilmanvuotoluku, ilmatiiviys, ilmanpitävyys		
Muut tiedot (<u>salassa pidettävät liitteet</u>)		

Author(s) Maula, Mia	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 81	Permission for web publication: x
Title of publication Development of air tightness measurements in buildings		
Degree programme Civil Engineering		
Supervisor(s) Korpinen Jussi, Viinikainen Marko		
Assigned by Inmeco Oy, Pasi Korhonen		
Abstract <p>The research was assigned by Inmeco Oy, a Jyväskylä-based construction consultancy company. One of its business areas is airtightness measurements.</p> <p>The aim was to clarify to the assignor if there is any development in their air leakage measurements and secondly, how the air leakage points have developed from 2010 to today. Particularly in relation to detached houses, a comparison between the companies that cooperate with the customer was desired. An additional requirement set by the assignor was to find out the differences in air leakage between different types of construction and to look at the differences between element building and on-site construction. In addition, for all types of buildings the air leakage points were compared, and it was examined whether the leakage points have changed or evolved over the years.</p> <p>The thesis started with a study of building regulations, physical phenomena in building, the basics of airtightness measurement, and the methods of locating the air leakage points in the building. The study also focused on the energy efficiency and indoor climate of buildings. Information was gathered from the assignor's airtightness reports. Altogether 72 study reports, including 45 detached houses, 17 flats and 10 terraced houses were studied. All reports were reviewed and an Excel spreadsheet was compiled, which provided the desired information about the buildings. Then diagrams were drawn up from the tables, which made it easy to analyse the air leakage of buildings.</p> <p>As a result, it was observed that development has taken place in all types of construction. The way of construction and a construction company have a major impact on the air tightness of buildings.</p>		
Keywords/tags (<u>subjects</u>) airtightness measurement, energy efficiency, air leakage, air tightness		
Miscellaneous (<u>Confidential information</u>)		

Sisältö

Käsitteistö.....	5
1 Johdanto	7
2 Ilmatiiviys.....	9
2.1 Ilmatiiviyden taustaa	10
2.2 Määräykset ilmanpitävyydestä	11
2.3 Ilmatiiviyden vaikutukset	16
2.3.1 Painesuhteet ja ilmatiiveys.....	17
Savupiippuvaikutus.....	19
Tuuli 20	
Ilmanvaihto.....	22
2.3.2 Sisäilmasto ja asumisviihtyvyyys	23
2.3.3 Energiatehokkuus	24
2.3.4 Rakenteiden kosteustekninen toiminta	25
Konvektio.....	26
Diffuusio	28
Lämmönsiirtyminen.....	31
2.4 Ilmatiiviyden toteutus	31
2.4.1 Höyrynsulku	32
2.4.2 Ilmansulkupaperi	33
2.4.3 Yksiaineiset rakenteet	33
3 Tiiviysmittaus	34
3.1 Paineokeen toteutus	35
3.2 Mittauksen rajaus ja alkutiedot	38
3.3 Mittauksen valmistelu	39
3.4 Mittaus	40

	2
3.5 Virheet	42
3.6 Vuotokohtien paikantaminen	43
3.6.1 Lämpökuvaus	43
3.6.2 Merkkisavu	45
3.7 Raportointi.....	46
3.8 Suurten rakennusten ilmatiivyyden mittaus.....	46
3.8.1 Rivitalot.....	47
3.8.2 Kerrostalot	47
4 Tutkimustulokset.....	48
4.1 Kokonaisvertailua talotyypeittäin	50
4.2 Pientalot	53
4.2.1 Pientalojen vuotokohdat	56
4.3 Kerrostalot.....	59
5 Yhteenveto tuloksista	61
6 Pohdinta.....	64
Lähteet	66
Liitteet	68
Liite 1. Tiiviysmittausraportti (Inmeco Oy arkisto).....	68
Liite 2. Tuloksista koottu taulukko Exceliin	81

Kuviot

Kuvio 1. Rakennuksen hyvän ilmatiiveyden periaate (Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2017).	9
Kuvio 2. Rakennuksen lämpöhäviön tasauslaskennan vaiheet (Tasauslaskentaopas 2018, 11).....	12
Kuvio 3. Selvitys vaipan ilmanpitävyydestä (Tasauslaskentaopas 2018, 40).	14
Kuvio 4. Tyypillisiä ilmanvuotolukuja rakennuksille (Energiatehokkuus 2018, 22).	15
Kuvio 5. Ilmanvuotoluvun energialuokituksen rajat (Paloniitty 2013, 64).	15
Kuvio 6. Ilmapitävyyden määräysten raja-arvot (Paloniitty 2013, 22).....	16
Kuvio 7. Yhteisvaikutus (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 122).....	18
Kuvio 8. Painejakauma ulkovaipan yli. Kerrostalon painejakaumassa on oletettu väliseinien ja välipohjien olevan ilmatiiviit. Mikäli väliseinässä on ilmavuotoja, siirtyy porrashuoneen painevaikutus kunkin huoneiston ulkoseinälle. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120.)	19
Kuvio 9. Savupiippuvaikutuksen aiheuttama ylipaine erikorkuisissa rakennuksissa (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121).	20
Kuvio 10. Tuulen painevaikutus (Siikanen 2014, 37).	21
Kuvio 11. Talon ilmatiiveyden vaikutukset tyypillisessä omakotitalossa (Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2017)	25
Kuvio 12. Konvektion vaikutus rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116).	27
Kuvio 13. Ilmavirtauksen vaikutus rakenteessa (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116).....	28
Kuvio 14. Diffuusion periaate. Pallot kuvaavat vesimolekyylejä ja nuoli diffuusion suuntaa (Mts. 113).	29
Kuvio 15. Taulukko eri materiaalien eri vesihöyrynvastuksista (Mts. 114).	29
Kuvio 16. Puuronkoisen seinän ulkopinnalta diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrä ja suunta vuoden aikana (Mts. 114).	30
Kuvio 17. Periaatekuva puurunkoisessa seinässä esiintyvän ilmavirtauksen vaikutuksesta. Rasteroidulla alueella on kosteusvaurioriski. (Mts. 166).....	30

Kuvio 18. Massiivisten ulkoseinien kosteustekninen toiminta (Mts. 157).	34
Kuvio 19. Höyrönsulun sijoitus lämmöneristetyssä hirsiseinässä (Mts. 139).	34
Kuvio 20. Vaipan tiiviysmittauksen periaate (Mts. 29).	35
Kuvio 21. Tiiveysmittauslaitteisto asennettuna (Inmeco Oy arkistokuva).....	37
Kuvio 22. Ilmavuotokäyrä, josta ilmenee ilmamäärä paine-eron suhteen yli- ja alipaineessa. (Inmeco Oy arkistokuva).....	42
Kuvio 23. Esimerkki ilmavuoto omakotitalon yläpohjan ja ulkoseinän liittymässä (Inmeco Oy arkistokuva)	44
Kuvio 24. Esimerkki lämpökamerasta (Fluke TiS45-lämpökamera 2018).....	44
Kuvio 25. Ilmavuotojen paikannus merkkisavulla (Ilmatiiveyden varmistaminen 2018).	45
Kuvio 26. Kaaviossa esitetty tutkittavien rakennusten lukumäärä rakennustyypeittäin	49
Kuvio 27. Ilmanvuotolukujen keskiarvot eriteltyinä rakennustyyppin mukaan.	51
Kuvio 28. Ilmanvuotoluvun kehityskaari vuosittain eriteltyinä rakennustyypeittäin. .	52
Kuvio 29. Vertailu kerroslukujen ja materiaalien suhteen.....	53
Kuvio 30. Kuvaajassa on esiteltyinä pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot rakennustavan mukaan.....	55
Kuvio 31. Yrityskohtainen vertailu	56
Kuvio 32. Vuotokohtien vertailu	57
Kuvio 33. Ikunoiden ja ovien vuotokohtatarkastelu	58
Kuvio 34. Läpivientien tarkastelut.....	59
Kuvio 35. Kerrostalojen vuotokohtatarkastelut	60
Kuvio 36. Kerrostalojen yritysten vertailu	61
Kuvio 37. Vuotuinen vuotoilman energiantarve (Rakennusten ilmatiiviiden ja energiatehokkuuden parantaminen 2015, 27).	63

Käsitteistö

E-luku

Laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku eli E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu vuotuinen ostoenergiankulutus, joka on laskettu lämmitettyä nettoalaa kohden.

Höyrinsulku

Ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.

Ilmanvuotoluku, n50

Ilmanvuotoluku n50 kertoo, montako kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipassa olevien vuotoreittien kautta, kun rakennukseen aiheutetaan 50 Pascalin paine-ero. Yksikkönä käytetään 1/h.

Ilmanvuotoluku, q50

Ilmanvuotoluku q50 tarkoittaa rakennuksen vuotoilmavirtaa tunnissa 50 Pascalin paine-erolla kokonaissämittojen mukaan laskettua rakennusvaipan pinta-alaa kohden. Yksikkönä käytetään $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$.

Ilmanvuotoluvun suunnitteluarvo

Ilmanvuotoluvun arvo, jota käytetään rakennuslupavaiheessa rakennuksen energiaselvitystä ja -todistusta laadittaessa.

Ilmanvuotoluvun vertailuarvo

Ilmanvuotoluvun arvo, jota käytetään rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa.

Ilmatiiviys

Ilmatiiviydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa haitallista ilmavirtausta rakenteen eri kerrosten läpi.

Ilmansulku

Ainekerros, joka estää haitallista ilmavirtausta kulkeutumasta rakenneosan läpi puolelta toiselle.

Rakennuksen vaippa

Rakennusosat, jotka erottavat lämpimän tilan ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta.

Rakennuksen vertailulämpöhäviö

Rakennuksen vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon vertailuarvoilla laskettu laskennallinen lämpöhäviö.

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 Pascalin paine-erossa (tai ilmanvuotokohtien etsiminen muussa, käyttötilannetta suuremmassa alipaineessa).

Painekoe

Rakennuksen ilmanpitävyyteen kehitetty koe, jossa rakenteeseen aiheutetaan ali- tai ylipaine, jotta vaipan ilmanpitävyyttä voitaisiin tutkia.

1 Johdanto

Rakennusten energiatehokkuudesta on puhuttu jo useita vuosia ja jatkuvasti pyritään yhä enemmän energiaa säästävään rakentamiseen. Rakennusten energiatehokkuusvaatimukset kiristyvät entisestään ja Suomi on sitoutunut Euroopan Unionin säättämiin energiatavoitteisiin, joissa pyritään kohti nollaenergiarakentamista vuoteen 2020 mennessä. Suomessa rakennusten energiankulutuksesta suurin osa kuluu rakennuksen lämmittämiseen. Rakennusten vaipan hyvä ilmatiiviys liittyy vahvasti hyvään ja energiataloudelliseen rakentamiseen. Ilmatiiviys estää haitallisen ilmavirtauksen rakenteiden läpi ja pienentää näin lämmitysenergian kulutusta merkittävästi.

Ilmatiiviissä rakennuksessa myös rakenteiden kosteustekninen toimivuus nousee isoon rooliin, sillä tiivistä rakenteesta on kosteuden vaikea päästä haihtumaan. Ilmatiivistä taloa pidetäänkin tämän vuoksi hieman ongelmallisena ja yhtenä kosteusvahinkoja aiheuttavana ratkaisuna. Laadukkaan rakentamisen arvo nousee näissä tapauksissa vahvasti esille. Rakentamista on monen laatuista ja rakentamisen laatua tarkkaillaankin nykyisin tiukemmin ja tarkemmin verrattuna edellisiin vuosikymmeniin.

Ilmatiivysmittaus on oleellinen osa rakentamisen laadunvarmistusta. Sen avulla rakennuksesta saadaan selvitettyä ilmanvuotoluku ja tarkastellaan mm. ilmanvuoto-kohtia jo rakennusvaiheessa. Mahdollisimman aikaisin havaitut puutteet ja epätiivisyyskohdat rakenteissa on helpompaa korjata rakennusaikana kuin lähteä jälkikäteen purkamaan valmiita rakenteita. Tällä tavoin rakennustyön tilaajakin varmistuu siitä, että lopputulos on laadukasta. Ilmatiivysmittauksesta saatua ilmanvuotolukua tarvitaan energiatodistuksen laskelmien lukuarvoja tarkastettaessa.

Tutkimus osuu siis hyvinkin ajankohtaiseen asiaan. Tutkimuksessa vertaillaan 2010-luvulta tähän päivään suoritettuja ilmatiivysmittauksia monesta eri näkökulmasta ja tutkitaan, miten ilmatiiviys on kehittynyt vuosien varrella. Työn tilaajana toimii Jyväskyläläinen rakennuskonsulttiyritys Inmeco Oy, joka tarjoaa yhtenä osa-alueena ilmatiivysmittauksia niin yksityisille henkilöille kuin yrityksillekin.

Tutkimuksen tavoitteena on laatia Exceliin taulukko, johon kootaan kaikki yrityksen tekemät vanhat ilmatiivysraportit kahdeksan vuoden ajalta. Taulukosta muodostetaan kaavioita, joista tutkitaan eri talotyyppien osalta erilaisia asioita. Tutkimuksessa

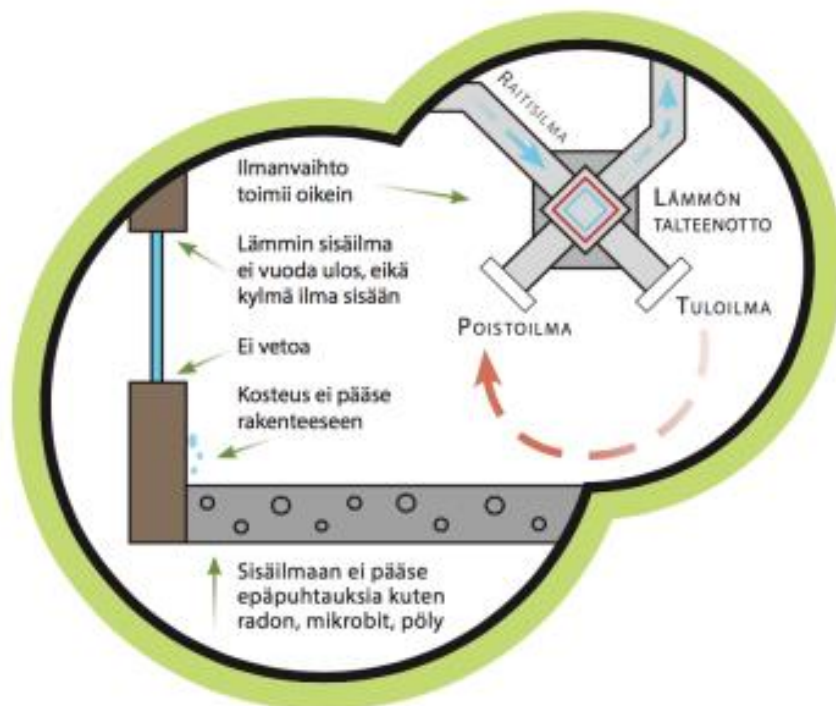
on keskitytty etenkin omakotitaloihin. Omakotitaloista muun muassa tarkastellaan, miten lisääntyvä elementtirakentaminen on vaikuttanut tiivyyteen. Miten eri kerros-
luvut vaikuttavat tiivyyteen? Onko puurunkoisilla ja harkkorakenteisilla taloilla suurta
eroa, ja entä miten ilmanvuotokohdat nykyään poikkeavat kahdeksan vuoden takai-
sesta, onko tässä tapahtunut kehitystä? Onko eri yritysten tuottamissa taloissa pal-
jonkin eroja, kun rakennetyyppi on sama?

Kyseessä on perustutkimus, jonka tavoitteena on tuottaa perustietoa tutkittavasta
asiasta tietoperustan lisäämiseksi. Tutkimustyyppinä on kvantitatiivinen tutkimus.
Havaintoaineisto perustuu määrälliseen mittaamiseen, muuttujat muodostetaan
taulukkomuotoon ja aineisto saatetaan tilastollisesti käsiteltävään muotoon. Päätel-
mät tehdään tilastollisesta analyysistä ja tulosten tulkinnassa testataan ja todenne-
taan hypoteeseja.

Ilmatiivyydestä on paljon tietoa saatavilla ja tutkimuksia on sen osalta tehty paljon.
Etenkin rakennusten energiatehokkuutta on tutkittu, sillä energiamääräykset ovat
tiukentuneet jatkuvasti. Aikaisemmissa tutkimuksissa ei ole juurikaan selvitetty li-
sääntyvän elementtirakentamisen näkyvyyttä ilmatiivyyden osalta. Myöskään yrityk-
sien välisiä eroja ei ole tarkasteltu. Yrityksillä saattaa olla paljonkin heittoja laadussa
ilmatiivyyden osalta. Tutkimuksessa pyritään saamaan selville mihin ilmanvuotolu-
kuun kunkin yrityksen rakentamien talojen tulisi sijoittua keskiarvoltaan.

2 Ilmatiiviys

Rakenteen ilmatiiviys tarkoittaa käsitteenä rakenteen kykyä vastustaa haitallista il-
mavirtausta rakenteen eri kerroksien läpi. Yhä enemmän kiinnitetään huomiota
energiatehokkaaseen rakentamiseen ja rakennusten ilmatiiviys on olennainen osa
energiatehokasta rakentamista. Energiatehokas talo koostuu paksuista eristeistä,
koneellisesta ilmanvaihdosta lämmöntalteenotolla sekä hyvästä ilmatiivyydestä. Kun
nämä kaikki kolme osa-aluetta toimivat, rakenteet pysyvät terveinä, sisäilma puhtaa-
na, ja rakennukselle saadaan erinomainen energiatehokkuus. Rakenteiden liitoksien
ja läpivientien kautta kulkeva ilmavirta voi aiheuttaa energiankulutuksen lisääntymis-
tä, kosteuden tiivistymistä rakenteisiin, vetoisuutta sekä haitallisten aineiden pääsyä
sisäilmaan. Näiden lisäksi hyvä tiiviys parantaa paloturvallisuutta ja ilmanvaihtoko-
neiden toimintaa. Rakennusten ilmatiivyyttä mitataan painekokeella, josta saadaan
määritettyä ilmanvuotoluku q_{50} . Ilmanvuotoluku kertoo, kuinka paljon ilmaa kulkee
rakennuksen vaipparakenteiden läpi. Lukuarvoa tarvitaan rakennuksen energiate-
hokkuuden määrittämiseen ja energiatodistukseen. (Ilmatiiveys ja vuotokohtat uu-
sissa rakennuksissa 2017.)



Kuvio 1. Rakennuksen hyvän ilmatiivyyden periaate (Ilmatiiveys ja vuotokohtat uusissa rakennuksissa 2017).

2.1 Ilmatiiviyden taustaa

Euroopan unionin joulukuussa 2008 hyväksymässä ilmasto- ja energiapaketissa on asetettu tavoitteita jotka ulottuvat vuoteen 2020. Suomelle asetettiin sitova tavoite, jossa uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta tulisi nostaa 38 prosenttiin. (Tasauslaskentaopas 2018, 6.)

Tästä seurauksena Suomeen tulivat vuonna 2008 voimaan rakennusmääräykset, jotka tiukensivat uusien rakennusten energiatehokkuusvaatimuksia. Tällöin alettiin myös kiinnittää entistä enemmän huomiota rakennusten tiiviyteen. Tästä lähtien rakennusten energiatodistusta laadittaessa täytyy olla tiedossa kohteen ilmanvuotoluku n_{50} . (Tiiviillä rakenteella kustannukset kuriin 2012.)

Vuonna 2010 Euroopan parlamentti on laatinut uudelleen direktiivin (2010/31/EU) rakennusten energiantehokkuudesta, jossa edellytetään siirtymistä lähes nollaenergiarakentamiseen vuoden 2020 loppuun mennessä kaikkien uudisrakennusten osalta. Lähes nollaenergiarakennuksella tarkoitetaan rakennusta, jolla on erittäin korkea energiatehokkuus. Rakennukseen tarvittavan vähäisen energian määrän tulisi myös hyvin pitkälti muodostua uusiutuvista energialähteistä. (Tasauslaskentaopas 2018, 6.) Kaikki rakenteiden epätiiviyskohdat lisäävät rakennusten energiankulutusta, joten vaipparakenteiden tiiviyteen tulee jatkossa entistä enemmän kiinnittää huomiota.

Ilmanvuotoluvun laskentaperusteissa tuli muutoksia Suomen rakennusmääräyskoelmaan 1.7.2012. Laskentaperusteet muuttuivat siten, että ennen käytössä ollut ilmanvuotoluku n_{50} ilmoitetaan tästä eteenpäin q_{50} -lukuna. (Tiiviillä rakenteella kustannukset kuriin 2012.)

N_{50} -luku ilmoittaa ilmanvuotoluvun rakennuksen suhteessa rakennuksen tilavuuteen ja nyt ilmanvuotoluku q_{50} saadaan vaipan pinta-alan suhteen. Muutokseen vaikutti olennaisesti se, että etenkin suuret rakennukset saivat geometriansa takia pienempiä tuloksia n_{50} -lukuna mitattuna kuin pienet rakennukset.

Vuonna 2015 tiiviysmittausstandardiin tuli muutos. Ennen käytössä ollut SFS-EN13829 korvattiin SFS-ISO 9972 standardilla. Uuteen standardiin tuli muutamia muutoksia, joita on käsitelty tarkemmin tutkimuksen luvussa 3.

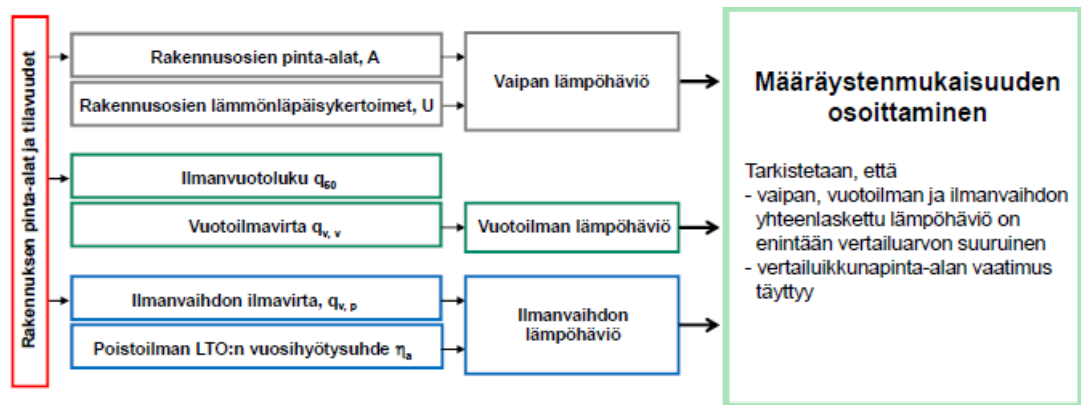
Uusimmat muutokset määräyksiin ovat tulleet vuoden 2018 alussa. Ennen käytössä olleet Rakentamismääräyskokoelmat ovat muuttuneet asetustasolle. Uusissa asetuksissa ja ohjeissa ei tullut muutoksia rakennusten ilmatiiviyden määrittämisen osalta. Tästä lähtien ilmatiiviyteen liittyvät asiat löytyvät seuraavista asetuksista ja ohjeista ympäristöministeriön www-sivuilta:

- 1010/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, josta taustamateriaalina Tasauslaskentaopas 2018 ja Perustelumuistio (2018)
- Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta ohjeet (2018)
- 782/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, josta taustamateriaalina Perustelumuistio ja Ympäristöopas C2: Kosteus rakentamisessa (1999)
- 1009/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, josta taustamateriaalina Perustelumuistio

2.2 Määräykset ilmanpitävyydestä

Rakennusvaipan sekä tilojen välisten rakenteiden tulisi olla niin ilmanpitäviä, että vuotokohtien läpi kulkevat ilmavirrat eivät aiheuta haittoja rakennuksen käyttäjille, rakenteille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Erityistä huomiota on kiinnitettävä rakenteiden liitoksien ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulku. (Tasauslaskentaopas 2018, 25.)

Rakennuksen ilmanvuotolukua tarvitaan määrittäessä rakennuksen lämpöhäviöitä, joita tarvitaan rakennuksen E-luvun laskennan osuudessa. Ilmatiiviysmittauksella tarkastetaan energiatodistuksen lämpöhäviössä käytettyä ilmanvuotolukua. Alla olevassa kuviossa (kuvio 2), on esitettyä lämpöhäviön tasauslaskennan vaiheet. Lämpöhäviöiden tasauskohteisiin kuuluu yhtenä osana ilmanvuotoluku ja vuotoilmavirta. Tasauslaskenta tehdään ennen rakentamista energiatodistusta varten ja tasauslaskennassa käytetyt arvot tulee osoittaa mittauksilla rakennuksen valmistuessa. Mikäli arvot ovat huonompia kuin laskenta-arvot, tulee tasauslaskenta päivittää.



Kuvio 2. Rakennuksen lämpöhäviön tasauslaskennan vaiheet (Tasauslaskentaopas 2018, 11).

Rakennuksen vertailulämpöhäviötä sekä suunnitteluratkaisun lämpöhäviötä laskettaessa käytetään rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun vertailuarvona $q_{50}=2,0\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Jos ilmanpitävyyden suunnitteluarvon toteutumista ei osoiteta mittaamalla tai laadunvarmistusmenettelyllä, on käytettävä rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun arvoa $q_{50}=4,0\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Ilmanvuotoluku voi ylittää arvon $4,0\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, jos rakennuksen käytön vaatimat rakenteelliset ratkaisut edellyttävät sitä. (Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017,19-20.)

Rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään rakennusvaipan ilmanvuotolukua $q_{50}=2,0\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ (Tasauslaskentaopas 2018, 25).

Mikäli ilmanpitävyys osoittautuu mittauksessa paremmaksi kuin suunnitteluratkaisussa käytetty arvo, on kannattavaa päivittää parempi arvo tasauslaskelmiin ja energiatodistukseen. Toisaalta taas, jos ilmanpitävyys todetaan mittaamalla huonommaksi kuin suunnitteluarvo, on ilmanpitävyyden parantaminen vertailutasoon yleensä välttämätöntä energiatehokkuuden ja rakennuksen toimivuuden vuoksi. (Tasauslaskentaopas 2018, 26.)

Vuotoilman lämpenemiseen tarvittava lämpöenergian tarve lasketaan kaavalla 1. (Energiatehokkuus 2018,21.)

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} (T_s - T_u) \Delta t / 100 \quad (1)$$

jossa:

$Q_{\text{vuotoilma}}$	<i>vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, kWh</i>
ρ_i	<i>ilman tiheys, 1,2 kg/m³</i>
c_{pi}	<i>ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/(kgK)</i>
$q_{v,\text{vuotoilma}}$	<i>vuotoilmavirta, m³/s</i>
T_s	<i>sisäilman lämpötila, °C</i>
T_u	<i>ulkoilman lämpötila, °C</i>
Δt	<i>ajanjakson pituus, h</i>
1000	<i>kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.</i>

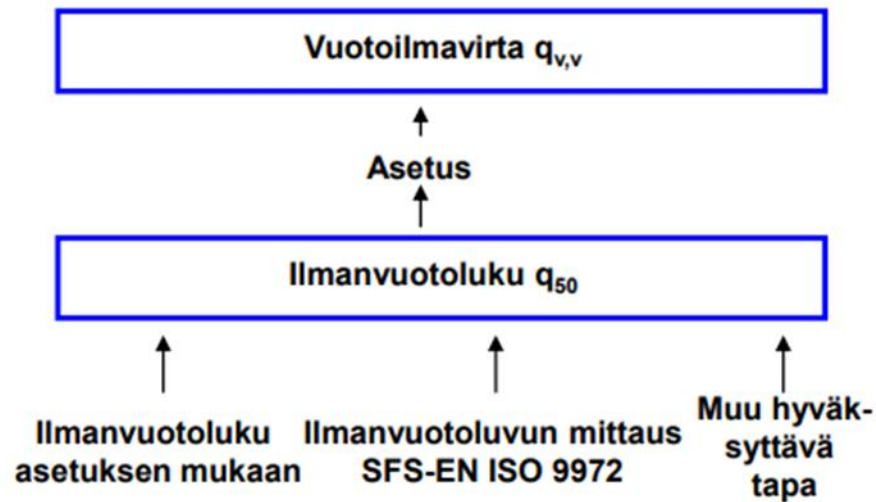
Vuotoilmavirta lasketaan kaavalla 2. (Tasauslaskentaopas 2018, 25.)

$$q_{v,\text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{\text{vaippa}} \quad (2)$$

jossa:

$q_{v,\text{vuotoilma}}$	<i>vuotoilmavirta, m³/s</i>
q_{50}	<i>rakennusvaipan ilmanvuotoluku, m³/(h m²)</i>
A_{vaippa}	<i>rakennusvaipan pinta-ala, m²</i>
x	<i>kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolme- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille korkeimmille rakennuksille 15</i>
3600	<i>kerroin, joka ilmavirran m³/h yksiköstä m³/s yksikköön.</i>

Selvitys vaipan ilmanpitävyydestä voidaan tehdä mittaamalla tai esimerkiksi teollisen laadunvarmistusmenettelyn avulla, jolla voidaan lämpöhäviön laskennassa käytettävä ilmanpitävyys luotettavasti arvioida ennakoita. Ilmanvuotoluku määritetään standardissa SFS-EN ISO 9972:2015 kuvatulla tavalla. Kuviossa 3 on esitetty havainnollistava kuva vuotoilmavirran selvitykseen vaadittavista vaiheista. (Tasauslaskentaopas 2018, 40.)



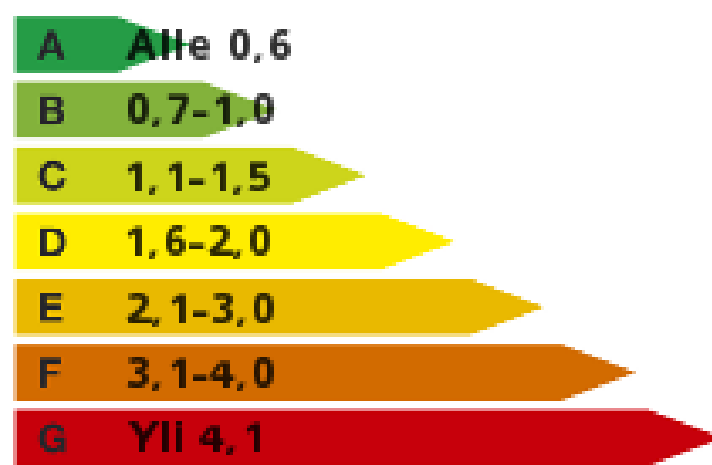
Kuvio 3. Selvitys vaipan ilmanpitävyydestä (Tasauslaskentaopas 2018, 40).

Selvennyksen vuoksi näistä määräyksistä voidaan tehdä yhteenveto ilmatiiviysluvulle. Eli määräyksissä ilmanvuodon lukuarvo $4,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ on ilmanvuotoluvun enimmäisarvo uudisrakennuksille, mutta vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään rakennusvaipan ilmanvuotolukua $2,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Kuviossa 4 on vastaavasti annettu tyyppillisiä ilmanvuotolukuja eriteltynä rakennustyypeittäin. Tästä kuvasta voidaan päätellä, että hyvän ilmanpitävyyden lukuarvona mennään lähemmäksi lukua $q_{50}=1,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$.

Tavoite-ilmanpitävyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset n_{50} -luvut, 1/h	Tyypilliset q_{50} -luvut, $m^3/(h \cdot m^2)$
Hyvä ilmanpitävyys	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa (erillistarkastus)	Pientalo 1,0 – 3,0	Pientalot 1,0 – 3,0
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 0,5 – 1,5	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,0 – 4,0
Keskimääräinen ilmanpitävyys	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 3,0 – 5,0	Pientalot 3,0 – 5,0
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,5 – 3,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 4,0 – 8,0
Heikko ilmanpitävyys	Ilmanpitävyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 5,0 – 10,0	Pientalot 5,0 – 10
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 3,0 – 7,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 8,0 – 20,0

Kuvio 4. Tyypillisiä ilmanvuotolukuja rakennuksille (Energiatehokkuus 2018, 22).

Kuviossa 5 on esiteltyä ilmatiiviiden raportoinnissakin käytetty ilmatiiviiden energialuokitus taulukko. Taulukossa huomataan, että A-luokkaan vaaditaan ilmatiiviiden luvuksi vähintään $q_{50}=0,6 \text{ m}^3/(h \cdot m^2)$.



Kuvio 5. Ilmanvuotoluvun energialuokituksen rajat (Paloniitty 2013, 64).

Seuraavassa taulukossa on esitettyä kaikista ilmapitävyyden osalta olevista määräyksistä raja-arvot.

q50 -luku	Selite
> 4	Poikkeukselliset rakenteelliset ratkaisut
≤ 4	Vähimmäisvaatimus uudisrakennuksille
2	Laskennassa käytettävä vertailuarvo = määräysten mukainen rakennus
≤ 1	Määräysten suositusarvo

Kuvio 6. Ilmapitävyyden määräysten raja-arvot (Paloniitty 2013, 22).

Ilmatiivyydestä täytyy huomioida se, että vaikka rakennukselle saataisiin pieni ilmanvuotoluku, ei se kuitenkaan tarkoita sitä, että vaipparakenne toimisi moitteettomasti. Vaipassa voi esiintyä paikallisia merkittäviäkin ilmavuotoja, jotka eivät näy ilmanvuotoluvussa. (Tasauslaskentaopas 2018, 25.)

2.3 Ilmatiivyyden vaikutukset

Kaikki määräykset ja asetukset ilmanpitävyydessä pohjautuvat kattaviin perusteluihin, miksi ilmatiivis rakenne tulisi toteuttaa.

Kuten aiemmin on todettu, ilmatiivisyys on keskeinen tekijä terveellisen ja viihtyisän sisäilmaston toteutuksessa. Ilmatiivisyys vaikuttaa rakennuksen kosteustekniseen toimintaan sekä sisäilman olosuhteisiin ja laatuun. Ilmatiiviin rakenteen tehtävänä on:

- estää haitallinen vesihöyryn siirtyminen sisäilmasta vaipparakenteisiin
- estää haitallisten epäpuhtauksien siirtymistä ulkoilmasta ja rakenteista sisäilmaan
- estää ulkoa sisäänpäin haitallista jäähdyttävää ilmavirtausta siten, ettei rakenteen sisäpintaan synny homekasvustolle edullisia olosuhteita
- vähentää rakennuksen energiankulutusta, kun ilmavuotojen läpi ei pääse lämpö karkaamaan
- estää vedontunne ulkoa sisäänpäin aiheuttamasta ilmavirrasta
- parantaa ja mahdollistaa rakennuksen oikeaoppisen koneellisen ilmanvaihdon siten, että rakennus pystytään pitämään alipaineisena ulkoilmaan nähden.

(RIL 255-1-2014, 46).

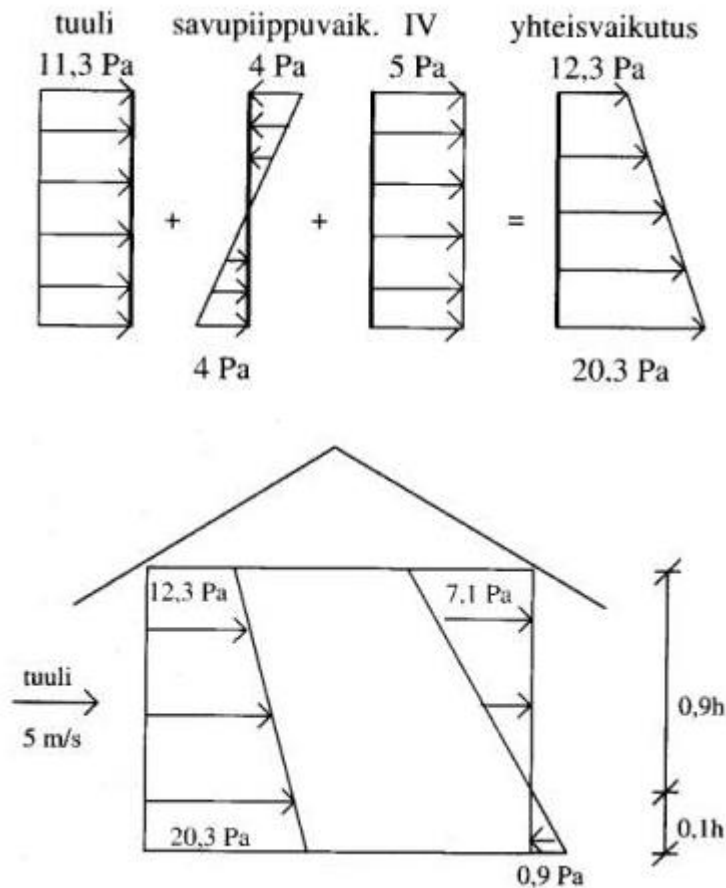
Näistä yksi tärkeimmistä tekijöistä on rakennuksen vaipparakenteen oikea kosteustekninen toiminta. Nykyään on siirrytty yhä enemmän paremmin eristäviin vaipparakenteisiin, joka tarkoittaa sitä, että hallitsemattoman vuotoilman kulkeutuminen rakenteiden sisään on estettävä, jotta vältytään rakenteiden kosteus- ja homevaurioriskeiltä. Talviaikana kosteutta voi olla sisäilmassa jopa $4-7 \text{ g/m}^3$, jolloin kosteuskonvektion riski kasvaa. Mikäli vaipassa on tällöin vuotoreittejä, voi sisäilman kosteus kulkeutua ilmavirtausten mukana kylmiin rakenteisiin ja aiheuttaa siellä kosteusvaurioriskin. Kun huolehditaan hyvästä ilmanpitävyydestä, niin kostea sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin. Myöskään kylmä ulkoilma ei pääse tällöin jäädyttämään rakennetta ja näin aiheuttamaan materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin homeen kasvulle otollisia olosuhteita tai kosteuden tiivistymisriskiä. (Paloniitty 2013, 7.)

2.3.1 Painesuhteet ja ilmatiiveys

Maapallon ympärillä oleva ilmamassa aiheuttaa ilmakehän paineen, jonka suuruus riippuu säästä ja mittauskorkeudesta. Ilmakehän paine maanpinnalla on noin 1 Bar, joka on 100 000 Pa. Ilmanpaine muodostuu kuivan ilma tiheydestä, joka on riippuvainen ilman lämpötilasta ja vesihöyryn osapaineesta. (Paloniitty 2013, 8.)

Ulkoilman ja rakennuksen välisen paine-eron yksikkönä käytetään Pascalia (Pa). Painesuhteet vaihtelevat usein rakennuksen sisä- ja ulkoilman välillä ja ne voivat muuttua hyvinkin nopeasti. Rakennuksen painesuhteet muodostuvat tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon sekä tilojen käytön yhteisvaikutuksesta (kuvio 7). (Paloniitty 2013, 8.)

Painesuhteet vaihtelevat edellä mainittujen vaikutuksesta siis eri vuorokauden- ja vuodenaikoina. Ilmanvaihtolaitteiston toiminta ja tuuli voivat muuttaa painesuhteita hyvinkin paljon jo yhden vuorokauden aikana. Savupiippuvaikutus taas muuttaa painesuhteita vuodenaikojen mukaan. Kokonaispaine-eron aiheuttama ilman virtaaminen aiheuttaa kosteusvaurioriskin, jos ilma jäähtyy virratessaan rakenteen läpi, mikä vastaa sisäpuolista ylipainetta. Rakennuksen vallitsevia painesuhteita ja kosteuskonvektion aiheuttamaa kosteusvaurioriskiä arvioidaan mittaamalla paine-ero rakenteen yli. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120.)



Kuvio 7. Yhteisvaikutus (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 122).

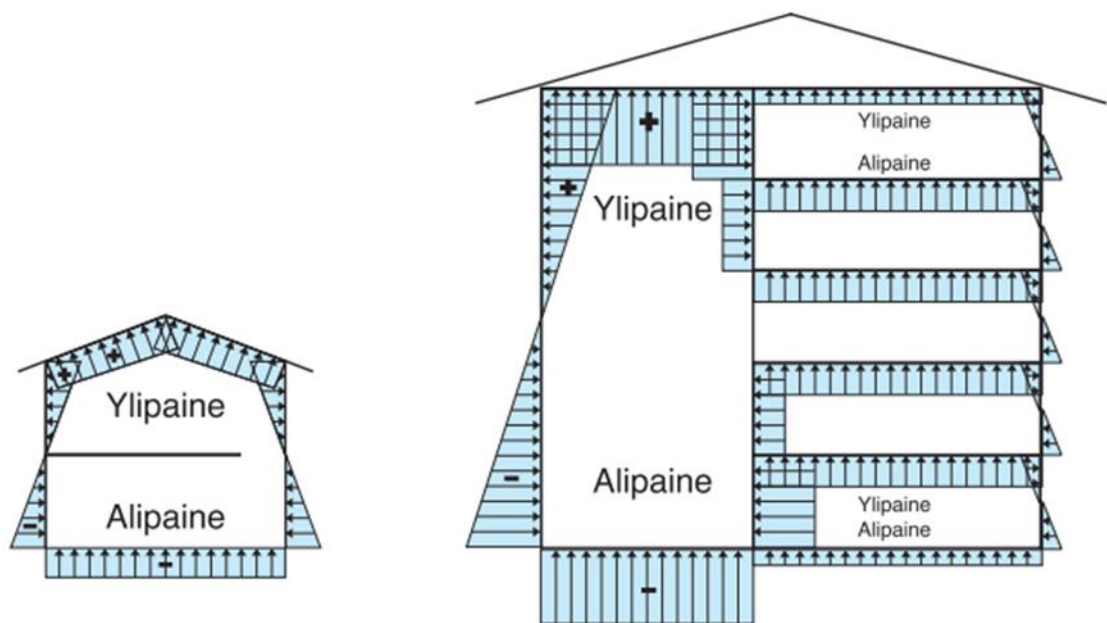
Rakennuksen painesuhteet ja vaipan ilmatiiviys liittyvät olennaisesti toisiinsa. Ilmanvuotolukua mitatessa selvitetään ilmavirtausten suuruutta ja merkitystä rakennuksen toiminnalle. Virtaukset siirtävät mukanaan lämpöä, kosteutta ja epäpuhtauksia. Sisäilmaan päästessään nämä voivat heikentää sisäilman laatua ja vaipparakenteiden läpi tapahtuvat hallitsemattomat ilmavirtaukset viilentävät rakenteita sekä huoneilmaa ja lisäävät siten myös energiankulutusta. Tämän vuoksi huoneilmaan ei tulisi ottaa korvausilmaa rakenteista, vaan korvausilma tulisi hoitaa hallitusti ilmanvaihtojärjestelmällä. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 118-119.)

Rakennuksien ilmanvaihtojärjestelmät tulisivat suunnitella ja säädellä niin, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi pitkäaikaisia kosteusrasituksia rakenteille, eikä alipaineen vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Suunnittelijoiden tulee ottaa huomioon vaipan ilmanpitävyys ja rakennuksen savupiippuvaikutus siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa. (Perustelumuiotio ympäris-

töministeriön asetukseen uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 2017, 18.)

Savupiippuvaikutus

Ulko- ja sisäilman lämpötilaeron aiheuttamaa paine-eroa kutsutaan savupiippuvaikutukseksi. Paine-ero syntyy seuraavasti: Kun huoneilma lämpenee, sen tiheys pienenee ja lämmennyt kevyt ilma nousee kylmää ilmaa kevyempänä ylöspäin. Tällöin rakennuksen sisäpuolella sen alaosiin muodostuu alipainetta ja yläosiin ylipainetta, ulkoilmaan verrattuna. Savupiippuvaikutus aiheuttaa kuvion 8 mukaisen paineja-kauman. Kuviossa 8 kerrostalojen painejakaumassa on oletettu väliseinien ja välipohjien olevan ilmatiiviit. Mikäli väliseinässä on ilmavuotoja, siirtyy porrashuoneen painevaikutus kunkin huoneiston ulkoseinälle. (Siikanen 2014, 35-36.)

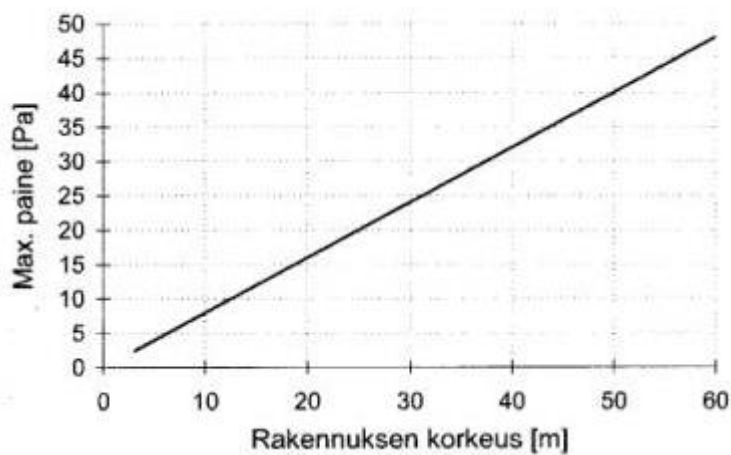


Kuvio 8. Painejakauma ulkovaipan yli. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120.)

Neutraaliakselilla paine-ero ulko- ja sisäilman välillä on 0 Pascalia, eli ilmanpaine on tässä kohtaa sama kuin ulkona vallitseva ilmanpaine. Neutraaliakselin sijainti riippuu mm. rakennuksen ulkovaipan aukotuksesta, ilmanvaihtokanavista ja tulisijasta huoneeseen. Tilassa, joka on täysin suljettu, neutraaliakseli sijaitsee huoneen keskellä. Tilassa, jossa on tulisija ja painovoimainen poistoilmanvaihto, saattaa neutraaliakseli olla aivan huoneen yläosassa. Tällöin lähes koko huonetila on alipaineinen. Mikäli on

huonetila, jossa on paljon aukkoja tilan alaosassa, saattaa neutraaliakseli sijaita lähellä huoneen alaosaa, jolloin lähes koko huonetilassa vallitsee ylipaine. (Siikanen 2014, 35-36.)

Savupiippuvaikutus on erityisen merkittävä talvella, jolloin sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on suuri. Esimerkiksi, kun ulko- ja sisälämpötilojen ero on 20 astetta, rakennuksen sisäpuolinen ylipaine nousee neutraaliakselista ylöspäin noin 0,9 Pascaalia metrillä (kuvio 9). Tästä syystä erityisesti rakennuksien yläosiin tulee kiinnittää erityistä huomiota rakennusta tiivistettäessä. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120.)



Kuvio 9. Savupiippuvaikutuksen aiheuttama ylipaine erikorkuisissa rakennuksissa (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121).

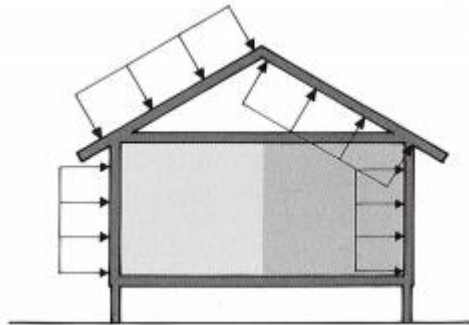
Savupiippuvaikutuksen vuoksi rakennuksen yläosan ylipaine saattaa jopa kumota ilmanvaihdon aiheuttaman alipaineen. Aina kun siirrytään korkeampiin rakennuksiin, jossa vapaa tila suurenee, kasvaa myös savupiippuvaikutuksen merkitys. Tästä syystä jo yli 10 metriä korkea rakennukset/tilat erotellaan omiksi ryhmiksi rakennussuunnittelussa ja rakenteiden ilman- ja vesihöyryntiiveys on tällöin erityisesti otettava huomioon. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120.)

Tuuli

Tuulen aiheuttamat paine-erot rakennukseen ovat suuruudeltaan ja suunnaltaan vaihtelevia. Tuulen aiheuttama painevaikutus riippuu tuulen suunnan ja voimakkuu-

den lisäksi rakennuksen geometriasta ja korkeudesta sekä ympäröivästä maastosta. (Siikanen 2014, 37.)

Tuuli aiheuttaa kohtaamaansa pintaan ylipainetta ja suojan puolelle alipainetta kuvion 10 mukaisesti. Paineekuvio ei ole aina vakio tuulen pyörteisyydestä johtuen. Tuuli saattaa aiheuttaa hyvinkin lyhytaikaisia, mutta suuria yli- ja alipaineita. (Siikanen 2014, 37.)



Kuvio 10. Tuulen painevaikutus (Siikanen 2014, 37).

Tuuli vaikuttaa rakennuksen sisälle asti, josta painesuhteet ja ilmanvaihto saattavat häiriintyä. Tuuli saattaa aiheuttaa myös ilmavirtauksia rakennuksen läpi. Hyvin pitkäaikainen samalta suunnalta puhaltava tuuli lisää huomattavasti mm. seinien läpi tapahtuvaa lämmön ja kosteuden siirtymistä sekä ikkunoiden huurtumista. Mitä suojaisemmassa paikassa rakennus on ja mitä tiiviimpi vaippa on, sitä vähemmän tuuli vaikuttaa rakennuksen energiatalouteen ja lämpövihtyisyyteen. (Siikanen 2014, 37.)

Tuulen aiheuttamat paine-erot voidaan laskea muotokertoimina tai numeerisesti. Paine-eron laskenta perustuu sisään ja ulos virtaavan ilman massatasapainoon. Tuulen suunta ja rakennuksen aukkojen sijainti vaikuttavat rakennuksen sisäpuoliseen paineeseen. Mikäli rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on muita seiniä epätiviimpi, rakennuksen sisäpuolelle muodostuu ylipainetta. Rakennuksen sisälle muodostuu vastaavasti alipainetta, jos suurin osa rakennuksen aukoista on suojan puoleisella seinällä. Yksittäistä rakennuspaikkaa tarkasteltaessa, rakennuspaikan vallitsevan tuulen suunnan avulla voidaan arvioida rakennukseen syntyvää yli- tai alipainetta aukkojen perusteella. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 119-120.)

Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä riippuu rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmästä. Ilmanvaihtojärjestelmä voi olla koneellinen tulo- poistojärjestelmä, koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, tai kahden edellisen yhdistelmä. Nykyrakentamisessa yleisin on ehdottomasti koneellinen tulo- poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla varustettuna. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä oli yleisin järjestelmä 1960-luvulla. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121.)

Koneelliset ilmanvaihtojärjestelmät aiheuttavat rakennukseen painesuhteita jotka määräytyvät ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuudesta ja säädöstä, rakennuksen vaipan tiiviydestä sekä tulo- ja poistoilmaventtiilien määrästä ja sijainnista. Rakennus on ylipaineinen, kun sisään puhallus on suurempi kuin poisto. Poiston ollessa suurempi kuin sisään puhallus, rakennus on alipaineinen. Rakennukseen ei saa koskaan tuoda enempää ilmaa kuin sieltä poistetaan. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121.)

Tavoitteellinen paine-ero on 0...-2 Pa koneellisella tulo- poistoilmanvaihtojärjestelmällä varustetuilla rakennuksilla. Mikäli alipaineisuus menee yli 15 Pa, niin syy tulee selvittää ja ilmanvaihtoa mahdollisuuksien mukaan tasapainottaa. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121.)

”Vaipan hyvällä ilmanpitävyydellä hallitaan rakennuksen painesuhteita ja sillä estetään mm. vesihöyryn haitallista konvektiota rakenteen läpi. Rakennus tulee pääsääntöisesti pitää alipaineisena.” (Kosteus rakentamisessa, Ympäristöopas C2 1999, 12.)

Ilmanpitävyyttä voidaan parantaa erilaisilla korjauksilla ja esimerkiksi ikkunaremontti on yksi yleisimmistä korjaustoimenpiteistä. Näissä tapauksissa on varmistuttava, että korvausilman saanti riittää ja tulo- ja poistoilmamäärien suhde tulee säätää vastaamaan muuttuneita painesuhteita. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 119.)

2.3.2 Sisäilmasto ja asumisviihtyvyys

Hyvä asumisviihtyvyys on yksi hyvä syy tavoitella hyvää ilmanpitävyyttä. Kylmän ulkoilman virtaaminen sisätiloihin aiheuttaa vedon tunnetta ja pahimmillaan jopa terveyshaittariskejä. Vaipan hyvä ilmanpitävyys parantaa sisäilman laatua ja estää epäpuhtauksien kulkeutumisen sisäilmaan. Lisäksi hyvä ilmanpitävyys parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa, kun kostea sisäilma ei pääse virtaamaan rakenteisiin. (Palo 2013, 20.) Rakennuksen paineet ja rakenteiden tiiviys onkin suunniteltava ja toteutettava siten, että ne vähentävät maaperässä ja rakenteissa olevien epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan (Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 2017, 18).

Rakennuksen painesuhteet ja rakenteiden ilmatiiviys vaikuttavat erilaisiin ilmavirtauksiin rakennuksissa. Painesuhteisiin taas vaikuttavat ilmanvaihto, ilman lämpötilaerot ja tuuli. Epäpuhtauksien kulkeutumisen kannalta yleensä kaikkein ongelmallisin tilanne syntyy silloin, kun on koneellinen poistoilmanvaihto ja korvausilmasta ei ole huolehdittu. Tällöin saattaa käydä niin, että sisäilmaan otetaan korvausilmaa rakenteiden kaikista epätiiveyskohdista esim. alapohjarakenteen kautta ja ilmavirtauksien mukana saattaa tulla maaperästä erilaisia hajuja sisäilmaan. (Ilmavirtaukset rakennuksessa 2018)

Painesuhteiden lisäksi sisäilmassa tapahtuviin ilmavirtauksiin vaikuttaa rakenteiden ilmatiiveys. Ilmavirtauksia ei voi rakenteissa tai rakennuksessa tapahtua, mikäli ei ole virtausreittejä ilmalle. Tyypillisimpiä virtausreittejä ovat rakenteiden saumat, halkeamat, läpiviennit sekä tarkistus- ja kulkuluukut. (Mts.)

Rakenteista sisäilmaan tapahtuvilla ilmavuodoilla on siis merkittävä vaikutus rakennuksen sisäilman laadulle. Tämä korostuu etenkin silloin, jos rakenteissa on ongelmia esim. VOC-yhdisteiden, PAH-yhdisteiden, mikrobien, hajujen tai muiden mahdollisten epäpuhtauksien kanssa. Hallitsemattomat ilmavirtaukset rakenteiden kautta voivat kuljettaa kaikkia epäpuhtauksia sisäilmaan, jossa ne voivat aiheuttaa haittaa rakennuksen käyttäjälle. Aina ei ole mahdollista poistaa rakenteiden sisällä olevia epäpuhtauksia, jolloin niiden haittoja voidaan vähentää katkaisemalla mahdolliset ilmavuodot rakenteissa. (RT14-11197 2018, 1.)

2.3.3 Energiatehokkuus

Energiatehokkuudesta on annettu direktiivi (2012/27/EU), joka vahvistaa unionissa yhteisen kehityksen energiatehokkuuden edistämistä koskeville toimenpiteille (Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017, 5). Näillä kansainvälisillä sopimuksilla ja ympäristötavoitteilla pyritään vähentämään energiankulutusta. Energiankulutuksella on taloudellinen, terveydellinen ja ympäristöön vaikuttava merkitys. Energiankulutuksen vähentämisellä voidaan vaikuttaa hiilidioksidin ja palamiskaasuissa olevien haitallisten aineiden määrään. Rakennuksissa kulutetaan suurin osa kaikesta ostetusta energiasta, joka kuluu lämmitykseen, lämpimän veden käyttöön, valaistukseen ja jäähdytykseen. (LVI 02-40078, s1)

Direktiivin mukaan uudisrakentamisessa pyritään lähes nollaenergiarakentamiseen vuoteen 2020 mennessä. Suomessa energia pääosin kuluu rakennuksien lämmittämiseen ja vaadittu nollaenergiarakentaminen tarkoittaa sitä, että kylmästä ulkoilmasta aiheutuvaa energiantarvetta tulee pienentää voimakkaasti. Samalla kun energiantarvetta pienennetään, on myös varmistuttava, että rakennuksessa toteutuu terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto. (Tasauslaskentaopas 2018, 6.)

Energiatehokkaassa rakennuksessa on hyvä sisäilmasto, toimiva talotekniikka ja pieni energiankulutus. Rakennusvaipan tiiviys vaikuttaa energiankulutukseen olennaisesti ja sitä myöten myös asumiskustannuksiin. Kun tilassa tunnetaan vetoisuutta, yleensä silloin nostetaan ilman lämpötilaa, jotta vedon tunteesta päästäisiin. Tämä nostaa talon lämmitystarvetta. Kun talossa on hyvä ilmanpitävyys, silloin myös lämmöntarve ja ilmanvaihdosta johtuva energiankulutus pienenevät. Hyvällä, tiiviillä ulkovaipalla saadaan rakennuksen energiatehokkuusluokkaa paranemaan energiatodistuksessa ja myös rakennuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt pienenevät. Asuinrakennuksen lämmönhukasta suurin osa johtuu hallitsemattomista vuotoilmavirroista rakenteissa. (Oikarinen 2013, 4.)

Seuraavassa taulukossa on hieman havainnollistettu sitä, miten suuri vaikutus ilmatiiveydellä on energiankulutukseen ja sitä myöten myös asumiskustannuksiin.

Tiiveys	Ilmanvuotoluku q50	Energiankulutus vuotokohtien kautta vuodessa	Kustannukset vuodessa	Kustannukset 20 vuodessa
Heikko (määräysten enimmäisarvo)	4,0	2600 kWh	360 €	7200 €
Erinomainen	0,5	300 kWh	40 €, säästää 320 €	800 €, säästää 6400 €

Kuvio 11. Talon ilmatiiveyden vaikutukset tyypillisessä omakotitalossa (Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2017)

Energiamääräyksien kiristyessä entisestään, on myös laadunvarmistus nykyistä yksityiskohtaisempaa energiatehokkuuden osoittamiseksi. Energiatehokkaan rakennuksen yhtenä laadunvarmistuskeinona on ilmatiiviiden mittaus ja lämpökuvaukset. Tästä mittauksesta saatua ilmatiiviiden lukuarvoa tarvitaan energiatodistuksessa rakennuksen lämmöntarpeen laskennassa.

Energiatodistuksesta ja sen antajasta säädetään laissa ja asetuksessa. *Laki rakennuksen energiatodistuksesta. Suomen säädöskokoelma 487/2007.* Energiatodistusten avulla voidaan vertailla rakennusten energiatehokkuutta muihin vastaaviin rakennuksiin. Energiatehokkuus ilmoitetaan asteikolla A...G. Vähiten energiaa kuluttaa A-luokan kiinteistö ja eniten G-luokan kiinteistö. Kiinteistön omistajan on hankittava energiatodistus, kun rakennus otetaan käyttöön, myydään tai vuokrataan. Energiatodistus on hankittava kaikille rakennuksille, joille haetaan rakennuslupaa ja olemassa oleville rakennuksille myynnin tai vuokrauksen yhteydessä. Laissa on mainittu myös erikoistapauksia, joissa ei energiatodistusta tarvita. (LVI 02-40078, 3)

2.3.4 Rakenteiden kosteustekninen toiminta

Ympäröivä ilma ja kaikki huokoiset materiaalit ja rakenteet sisältävät kosteutta. Määrä riippuu materiaalin ominaisuuksista ja vallitsevan ilman lämpötilasta ja kosteudesta. Rakenteisiin voi käytön aikana siirtyä kosteutta josta voi aiheutua kosteusvaurioriski. Vaurio voi syntyä mm. rakennuksen vaipan sisäpinnoille, sisäkuoren ulkopinnoille, eristekerrokseen ja ulkokuoren sisäpinnoille. Useat näistä ovat seurausta ra-

kennusvaipan ilmavuodoista. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 147-148.)

Ympäristöministeriön julkaisemassa ympäristöoppaassa on annettu ohjeistuksia vaipparakenteiden oikeaoppiseen toteuttamiseen:

”Rakenteet on tehtävä siten, ettei sisäistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin oleva vesi missään olomuodossa pysty tunkeutumaan rakenteisiin ja rakennuksen sisätiloihin.” (Kosteus rakentamisessa, Ympäristöopas C2 1999, 12.)

Vaipparakenteiden ja sen liittymien vesihöyrynvastuksen ja ilmatiiviyyden on oltava sellainen, ettei vaipan kosteuspitoisuus sisäilman sisältämän vesihöyryn diffuusion tai konvektion vuoksi muodostu haitalliseksi. Rakennuskosteuden ja mahdollisesti seinään satunnaisesti tunkeutuvan veden on voitava poistua vahinkoa ja terveysriskiä aiheuttamatta. (Kosteus rakentamisessa, Ympäristöopas C2 1999, 31.)

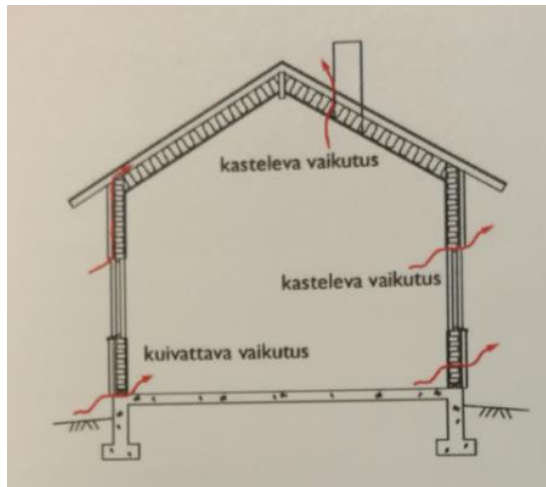
”Myös ikkunoiden ja ovien on oltava riittävän tiiviitä vuotoilman ja ulkopuolisen veden kannalta.” (Kosteus rakentamisessa, Ympäristöopas C2 1999,34.)

Sisä- tai ulkoilman sisältämä kosteus siirtyy rakenteisiin mm. diffuusion ja kosteus-konvektion kautta. Se kumpi näistä on hallitseva kosteudensiirtymismuoto, riippuu rakenteen vesihöyrynläpäisevyydestä, ilmanläpäisevyydestä ja rakenteen eheydestä. Rakenne on tehtävä sisäpinnastaan riittävän ilmatiiviiksi ja lisäksi rakennuksen painesuhteiden ulkoilmaan verrattuna on oltava sellaiset, että lämmintä ilmaa ei virtaa kylmiin rakenteisiin. Vaurioriski on aina olemassa, kun rakenteen lämpimällä puolella ylipaine on hallitseva. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116.)

Konvektio

Kosteuskonvektiolla tarkoitetaan ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmapirran mukana sen liikkeessä kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Ilma virtaa suuremmasta paineesta pienempään paineeseen. Kosteuskonvektiolla voi olla rakenteita kuivattava vaikutus silloin kun ilma lämpenee virratessaan rakenteen läpi. Kosteusvaurion kannalta konvektio muuttuu haitalliseksi rakenteen kastuessa, kun ilma jäähtyy virratessaan rakenteen läpi. Kosteus tiivistyy rakenteeseen, jos ilma jäähtyy rakenteessa

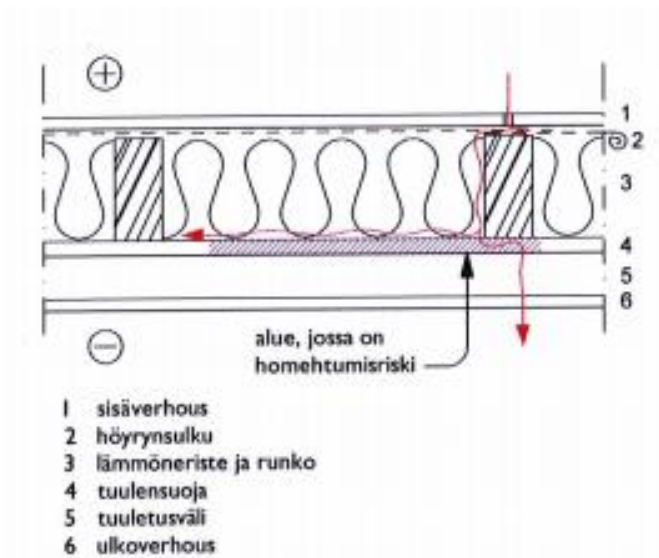
alle kastepisteen (kuvio 12). (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116.)



Kuvio 12. Konvektion vaikutus rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116).

Ilmavirtaa, joka kuljettaa mukanaan kosteutta, saattaa esiintyä seinän sisäisenä, eli ilman tiheyseroista johtuvana ns. luonnollisena konvektiona tai rakenteessa olevien reikien ja ilmavuotojen kautta paine-erojen vaikutuksesta tapahtuvana pakotettuna konvektiona (Siikanen 2014, 72).

Rakenteiden toiminnan kannalta konvektiolla on suurin merkitys kylminä vuodenaikoina. Ilmavirtaukset jotka tapahtuvat reikien kautta sisältä ulos ilmanpaine-erojen vaikutuksesta, saattavat kuljettaa moninkertaisia kosteusmääriä diffuusion verrattuna. (Siikanen 2014, 72.)

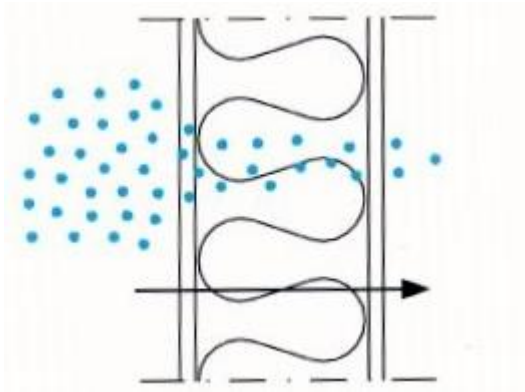


Kuvio 13. Ilmavirtauksen vaikutus rakenteessa (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116).

Kuviossa 13 on esimerkki kosteuskonvektion aiheuttamasta kosteusvaurioriskistä, kun on kyseessä puurunkoinen rakenne. Sisäilma, joka on lämmintä ja kosteaa, virtaa ulkoseinän lämmöneristekerrokseen sisäverhouksen ja höyrynsulun epätiivien saumojen kautta. Lämmöneristeestä kosteus siirtyy tuulensuojakerrokseen ja tuuletusväliin. Vaurioitumisriski syntyy näin rakenteen kylmiin osiin, joissa lämpötilan lasku aiheuttaa ilman suhteellisen kosteuden nousun ja näin ollen kosteus voi pahimmillaan kondensoitua rakenteisiin. Kosteuskonvektion estämiseksi rakennukset suunnitellaan yleensä alipaineisiksi. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 116-117.)

Diffuusio

Kosteutta siirtyy myös diffuusion avulla. Diffuusioilmiössä ilmassa olevat vesimolekyylit pyrkivät liikkumaan siten, että vesihöyryn pitoisuuserot jakaantuvat tasaisesti ilmassa (kuvio 14). Diffuusion suuruutta voidaan arvioida vesihöyryn pitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden erolla. kosteus siirtymissuunta on suuremmasta vesihöyrynpitoisuudesta pienempään. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 113.)



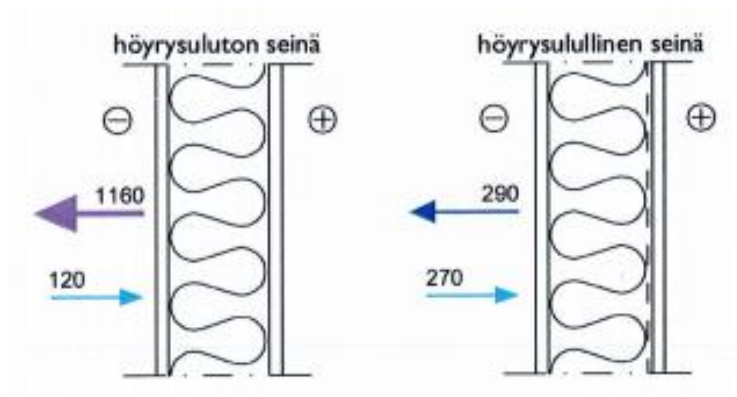
Kuvio 14. Diffuusion periaate. Pallot kuvaavat vesimolekyylejä ja nuoli diffuusion suuntaa (Mts. 113).

Diffuusio riippuu ilman vesihöyryn osapaine-erosta ja siitä kuinka hyvin materiaali vastustavat vesihöyrynläpäisevyyttä. Materiaalien vesihöyrynvastukset vaihtelevat paljon ja esim. höyrynsulkumuovin vesihöyrynvastus on 1000 kertaa suurempi kuin mineraalivillan (kuvio 15). Talvella diffuusion merkitys on suurempi kuin kesällä, koska sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyryn osapaine-ero on suurempi. Kesällä kosteus siirtyy diffuusiolla ulkoilmasta rakenteen sisälle riippumatta rakenteen höyrynsulun olemassaolosta. Talvella vesihöyry siirtyy rakenteesta ulospäin. (Mts. 114.)

Materiaali	Paksuus [mm]	Vesihöyrynvastus Z_p [m^2sPa/kg]
Kipsilevy	13	$0,45 \times 10^9$
EPS-lämmöneriste	30	$3...9 \times 10^9$
Kevytsosementiharkko	200	8×10^9
Filmivaneri	12	63×10^9
PE-kalvo	0.2	$100...500 \times 10^9$
Kumibitumikermi	3	$800...1\ 500 \times 10^9$

Kuvio 15. Taulukko eri materiaalien eri vesihöyrynvastuksista (Mts. 114).

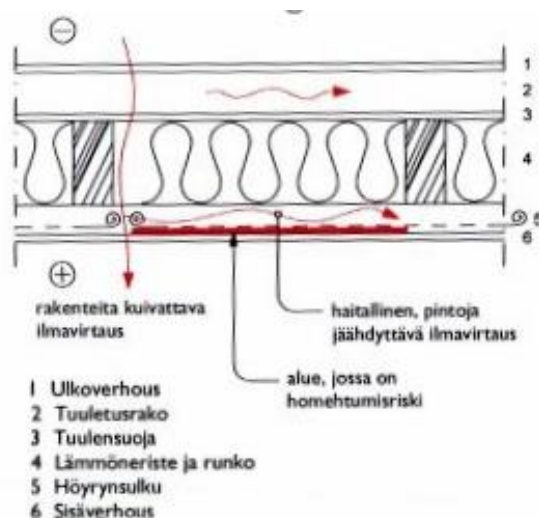
Kuviossa 16 on esitetty periaatekuva havainnollistamaan diffuusiota vertailemalla puurunkoista höyrynsulutonta ja höyrynsulullista rakennetta. Huomataan, että höyrynsuluttomassa seinässä kosteutta siirtyy runsaasti seinän läpi vuodessa ja kosteus on moninkertainen ulkoa sisälle siirtävään kosteuteen verrattuna. Höyrynsulullisessa rakenteessa taas sisään ja ulos virtaavan kosteuden määrä on pitkällä aikavälillä lähes tasapainossa. (Mts. 114.)



Kuvio 16. Puurunkoisien seinien ulkopinnalta diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrä ja suunta vuoden aikana (Mts. 114).

Kerroksellisen seinärakenteen toimivuuden lähtökohta on, että vesihöyrynvastusten tulee pienentyä kylmään tilaan päin mentäessä. Lämmöneristeen sisäpuolisten materiaalien vesihöyrynvastus tulisi olla vähintään viisinkertainen lämmöneristeen ulkopuolisiin materiaaleihin nähden. (Mts. 114-116.)

Ulkoseinän lämmöneristeen lämpimällä puolella vallitsee homehtumisriski niillä alueille, joissa on kylmäsiltoja tai rakennetta jäähdyttäviä ilmavirtauksia. Erityisesti lämmöneristeen lämpimällä puolella kylmä ulkoilma jäähdyttää sisäkuoren ulkopintaa (kuvio 17). Sisäkuoren ulkopinnan homehtumisriski johtuu höyrynsulun jäähtymisestä, mikä lisää sisäilman kosteuden siirtymistä sisäkuoren läpi. Höyrynsulku vähentää sisältäpäin tulevaa vesihöyryä rakenteen läpi, jolloin kosteus lisääntyy sisäkuoresa. (Mts. 166.)



Kuvio 17. Periaatekuva puurunkoisessa seinässä esiintyvän ilmavirtauksen vaikutuksesta. Rasteroidulla alueella on kosteusvaurioriski. (Mts. 166).

Lämmönsiirtyminen

Lämmönsiirtyminen vaikuttaa huomattavasti kosteudensiirtymiseen. Jos rakenne viilenee paikallisesti, rakenteiden suhteellinen kosteus kasvaa sisäosissa. Tämä voi johtua esimerkiksi kylmäsillasta tai lämmöneristeiden huolimattomasta asennuksesta, jolloin rakenteen sisäosiin pääsee virtaamaan kylmää ilmaa. Kylmäsillat ja ilmapuodot voivat aiheuttaa kosteuden kondensoitumista rakenteen sisällä. Nämä voivat pitkällä aikavälillä johtaa kosteusvaurioihin. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 117.)

2.4 Ilmatiivyyden toteutus

Vaipparakenteet tulisi toteuttaa siten, että rakenteiden sisäpinta on vesihöyryntiiviimpi kuin ulkopinta. Käytännössä tämä tarkoittaa erillisen höyrynsulun käyttämistä lämmöneristeen sisäpinnassa tai sisäosassa. Höyrynsulun avulla rajoitetaan diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn siirtymisnopeutta rakenteisiin. Höyrynsulun merkitys korostuu tiloissa, joissa sisäilman vesihöyrypitoisuus on normaalia korkeampi. Jos höyrynsulku on puutteellinen, voi vesihöyry tiivistyä rakenteen ulko-osissa. Vanhoissa rakennuksissa ei aina ole käytetty höyrynsulkua, mutta se ei silti automaattisesti tarkoita sitä, etteikö rakenne voisi olla toimiva. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 156.)

Rakenteen sisäpinnan vesihöyryntiiviyttäkin tärkeämpää on rakenteen sisäpinnan ilmatiiviyys. Hyvällä ilmatiiviydellä estetään hallitsemattomia vuotoilmavirtoja rakenteeseen ja lisäksi ilmapuotojen kautta siirtyy epäpuhtauksia sisäilmaan. Hyvä ilmatiiviyys edellyttää höyrynsulun/ilmansulun limitysten, liittymien ja läpivientien huolellista suunnittelua ja toteutusta. Rakennuksen sisätilojen alipaineisuus edellyttää höyrynsulun/ilmansulun ilmatiiviyttä. (Mts. 156)

Ilmansululla ja höyrynsululla on yksi merkittävä eroavaisuus. Höyrynsulku on ainekerros, jolla on riittävän suuri vesihöyrynvastus estämään sisäilman vesihöyryn diffusiovirtaukset rakenteisiin. Höyrynsulku toimii rakenteessa myös ilmansulkuna. Ilmansulku on vastaavasti ainekerros, jolla on riittävän pieni ilmanläpäisevyys estämään ilmapuodot rakenteen läpi. Mutta ilmansulku ei voi toimia höyrynsulkuna, joh-

tuen sen pienestä vesihöyrynvastuksesta. Ilmansulku on tärkein tekijä rakennuksen kokonaistiiveyttä tarkasteltaessa. (RIL 255-1-2014, 253.)

Ilman- ja/tai höyrynsulkuna käytetään yleensä erilaisia kalvoja ja levyjä. Mikäli rakenne on massiivinen, voi se myös itse toimia ilman-/höyrynsulkuna. Esimerkiksi massiivinen betonieinä voi toimia sekä ilman-, että höyrynsulkuna, mutta esimerkiksi harkkoseinä ei yksistään toimi ilmanpitävänä kerroksena, vaan vaatii erillisen pintakäsittelyn (esimerkiksi rappaus), joka toimii rakenteessa ilmansulkuna. Ilmansulkuna voi toimia myös erilaiset rakennuspaperit, pahvit, muovimatot tai -tapetit. Höyrynsulkuna rakenteessa voivat toimia lisäksi erilaiset pinnoitteet tai sivelyt. (Mts. 253.)

2.4.1 Höyrynsulku

Vesihöyryntiiviin höyrynsulun käyttö on aina suositeltavaa rakennuksissa, joissa on rankarakenteiset seinät ja normaalit sisäilman olosuhteet (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 137). Höyrynsulun käyttöä voidaan perustella laskelmin. Mikäli laskelmin voidaan osoittaa, että vesihöyry tiivistyy rakenteisiin diffuusion seurauksena, on rakenteessa käytettävä höyrynsulkua. Höyrynsulun kaikki saumat, läpiviennit ja liittymät rakenteisiin on tehtävä huolella, jotta ainekerroksesta tulee tiivis. Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan aine- tai rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen on oltava lämmityskauden toimintaoloissa vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevaan ainekerroksen vesihöyrynvastukseen. Tämä ehto ei kuitenkaan aina ole rakenteen rakennusfysikaalisen toimivuuden kannalta riittävä, sillä tähän vaikuttaa myös materiaalien kosteuskapasiteetin suuruus. (RIL255-1-2014, 253.)

Yleisimmin käytettäviä höyrynsulkuja ovat höyrynsulkumuovit ja -paperit. Nämä voidaan eritellä kahteen ryhmään toimivuutensa kannalta. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat tuotteet, joiden diffuusiovastus on vakio ja toisen ryhmän tuotteilla diffuusiovastustuskyky vaihtuu ympäröivän kosteuden mukaan. (Mts. 253)

Yleensä höyrynsulkuna käytetään polyeteenikalvoa (PE-kalvo). Tämä ei juurikaan päästä lävitseen vesihöyryä ja on riippumaton ympäristön olosuhteista, eli se on aina yhtä vesihöyryntiivis. (Mts. 254)

On olemassa myös niin kutsuttuja hygrokalvoja, jotka päästävät tietyissä olosuhteissa vesihöyryä lävitseen. Eli ne ovat ns. kaksitoimisia kosteutta tasaavia kalvoja, joilla on ympäristön kosteuden mukaan vaihtuva diffuusionvastustuskyky. Tällaisen kosteutta tasaavan höyrynsulun ideana on, että vesihöyry ei pääse missään olosuhteissa tiivistymään rakenteisiin. Diffuusion suunnalla ei täten ole merkitystä. Kosteutta tasaava höyrynsulku päästää kosteuden poistumaan rakenteista vuodenajan ja ilman kosteuspiitoisuuden mukaan joko sisälle- tai ulospäin. (Mts. 254)

Höyrynsulkumuovin kanssa eristeenä käytetään epäorgaanisia mineraalieristeitä. Mineraalivilla ei sido kosteutta ja on siksi hyvä valinta höyrynsulkumuovin kanssa käytettäväksi. (Romppainen 2010, 27.)

2.4.2 Ilmansulkupaperi

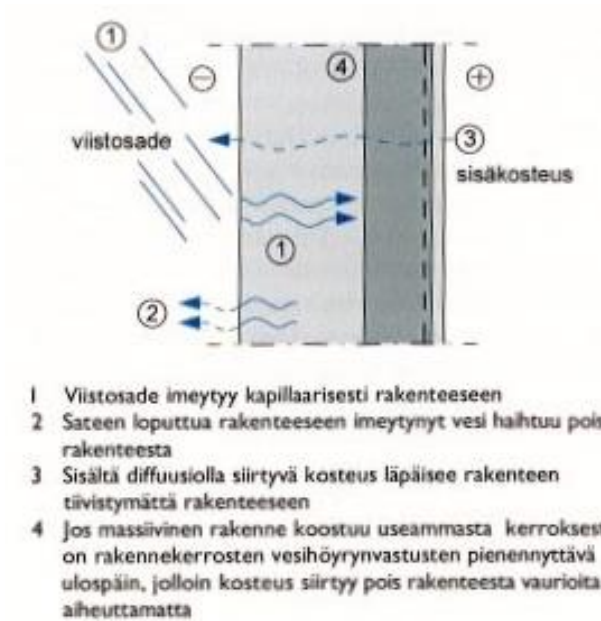
Ilmansulku sijoitetaan höyrynsulun tavoin lähelle rakenteen sisäpintaa. Tällöin se rajoittaa haitallisia ilmavirtauksia rakenteen läpi. (RIL 255-1-2014, 253.)

Rakennuksen ilmansulkuna käytetään useimmiten ilmansulkupaperia. Ilmansulkupaperi ei ole höyrynsulku. Ilmansulkupaperia käytettäessä valitaan eristeeksi yleensä orgaanisia puukuitu- ja pellavaeristeitä.

Jos rakennuksessa on runsasta kosteudentuottoa, rakenne ei kestä kosteutta tai kosteus ei pääse poistumaan rakenteesta riittävän tehokkaasti, on ilmansulku korvattava höyrynsululla (Toimivat katot 2013, 8).

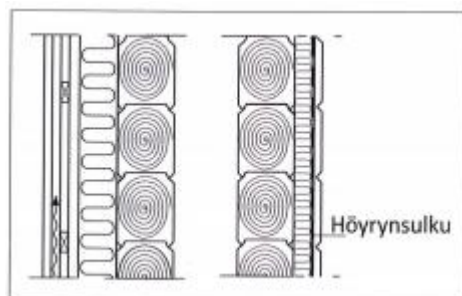
2.4.3 Yksiaineiset rakenteet

Massiivisia ulkoseinärakenteita ovat esimerkiksi betoniseinät ja hirsirakenteiset seinät. Massiivisille ulkoseinärakenteille on tyypillistä suuri kosteudentuotomiskyky. Rakenteessa voi olla paljonkin sitoutuneena kosteutta, joka poistuu hitaasti. Nämä rakenteet eivät tarvitse, eikä niihin pidä laittaa erillistä ilmansulkukerrosta, koska ne itsessään ovat riittävän tiiviitä ilmanpitävyydeltään. Kts. kuvio 18. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 157.)



Kuvio 18. Massiivisten ulkoseinien kosteustekninen toiminta (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 157).

Mikäli hirsiseinää on lämmöneristettävä, tulisi höyrynsulku sijoittaa kuvion 19 mukaisesti kosteusvaurioriskien välttämiseksi (RIL 255-1-2014, 139).



Kuvio 19. Höyrynsulun sijoitus lämmöneristetyssä hirsiseinässä (RIL 255-1-2014, 139).

Muurattuja seiniä voidaan tehdä myös massiivisina, tällöin sisäpuolinen seinä toimii rakenteen ilmansulkuna. Muurattu tiili- tai harkkoseinä on riittävän ilmatiivis, mikäli ne tasoitetaan tai rapataan. Harkkoseinän saumat ja kevytsoraharkot eivät ole itsessään kovin ilmatiiviitä, joten näissä ilmatiivis rappauspinta tulee ulottaa niin, että se voidaan liittää muihin rakenteiden ilmatiiviisiin kerroksiin. (Mts. 131.)

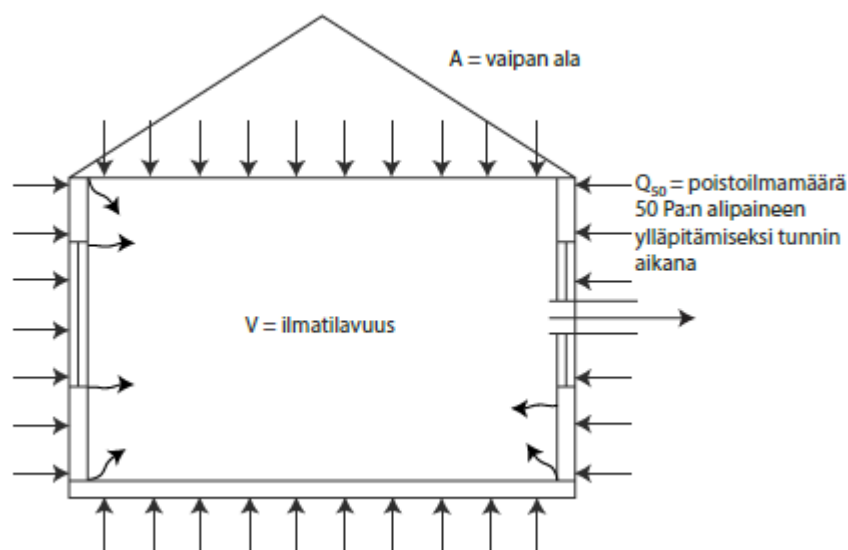
3 Tiiviysmittaus

Ilmansulun toimivuutta voidaan osoittaa mittausjärjestelyin, mistä saadaan tulokseksi ilmanvuotoluku. Ilmanvuotoluku kertoo kuinka paljon ilmaa vuotaa vaipan raken-

teiden läpi yhden tunnin aikana, sisä- ja ulkotilojen välisen paine-eron ollessa 50 Pa. Rakennuksen ilmanvuotolukua tarvitaan lähtötietona rakennuksen lämmöntarpeen laskennassa. Uudisrakennuksissa lämmöntarvetta tarkastellaan rakennuslupavaiheessa lämpöhäviöiden laskennassa sekä energiaselvitystä ja -todistusta laadittaessa. Ilmanvuotoluvun arvo tarkastetaan mittaamalla ennen rakennuksen käyttöönottoa. Vanhojen rakennusten osalta ilmanvuotolukua tarvitaan, mikäli halutaan saada rakennukselle energiatodistus. Nykyään energiatodistus on pakollinen, mikäli olet myymässä rakennusta.

3.1 Paineekokeen toteutus

Rakennuksen tiivyyttä mitataan niin kutsutulla paine-eromenetelmällä, jossa tutkittavaan tilaan aiheutetaan paine-ero ulkoilmaan nähden. Paine-ero saadaan aikaan puhaltimella. Puhallin asennetaan yleensä rakennuksen ulko-oveen. Puhaltimena voidaan käyttää tarvittaessa rakennuksen omaa ilmanvaihtolaitteistoa. Tämä ei tosin anna yhtä luotettavaa arvoa kuin tiiviysmittaukseen suunniteltu erillinen puhallin (Paloniitty 2013, 29.)



Kuvio 20. Vaipan tiiviysmittauksen periaate (Mts. 29).

Mittaus suoritetaan usealla paine-erolla. Paine-eron saavuttamiseksi on mitattava puhaltimen läpi virtaavat ilmamäärät. Mittaussarjasta lasketaan vuotoilmakäyrä, jonka avulla lasketaan 50 Pa paine-eroa vastaava ilmamäärä. Kun 50 Pa:n paine-eron ylläpitämiseksi tunnin aikana tarvittava ilmamäärä Q jaetaan tutkittavan tilan vaipan

alalla A, saadaan ilmanvuotoluku q_{50} . Mikäli halutaan selvittää myös n_{50} , niin ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella V. Ilmanvuotoluku q_{50} esitetään yksikössä $m^3/(hm^2)$ ja ilmanvuotoluku n_{50} esitetään yksikössä 1/h, vaihtoa tunnissa. (Mts. 29.)

Ilmanvuotoluku q_{50} laskentakaava

$$q_{50} = Q_{50}/A \quad (3)$$

Jossa:

q_{50} = rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla $m^3/(h m^2)$

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

A = rakennuksen/mitattavan osan ulkovaipan ala m^2

(Mts. 29.)

Ilmanvuotoluku n_{50} laskentakaava

$$n_{50} = Q_{50}/V \quad (4)$$

Jossa:

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

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

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

(Mts. 29.)

n_{50} -luku yleensä pienentyy rakennuksen tilavuuden kasvaessa, vaikka vaipan ilmanpitävyys ei paranekaan. Tästä johtuen q_{50} -luku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä suuremmissa rakennuksissa. Ilmanpitävyyden mittaustuloksena on suositeltavaa ilmoittaa sekä q_{50} , että n_{50} -luku, vaikka energiaselvitystä laadittaessa käytetäänkin q_{50} -lukua.

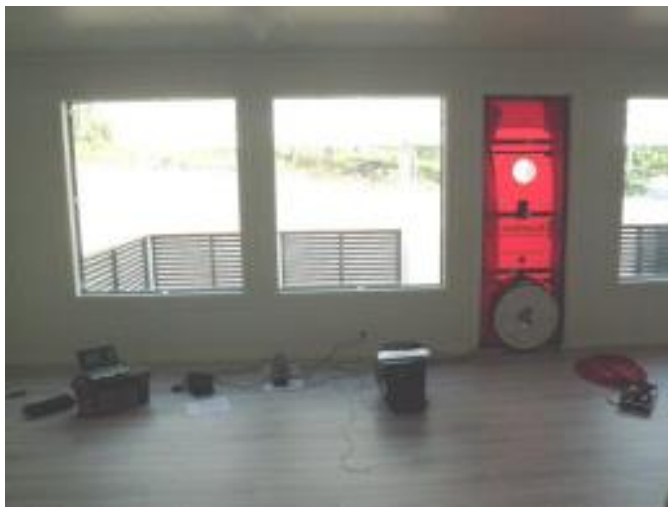
Rakennuksen ilmapitävyyden mittaaminen painekoemenetelmällä on esitetty standardissa SFS-EN ISO 9972 (kumonnut 5.10.2015 aiemmin käytössä olleen standardin SFS-EN 13829). Suomessa käytetään standardissa esitettyä mittausten menetelmää 2, rakennuksen vaipan testaus. Tässä menetelmässä rakennukseen tarkoituksellisesti

ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot sekä tulisijat ja hormit suljetaan tiiviisti. (RT80-10974 2009, 10.)

Ilmanvuotoluvun mittaus tapahtuu ensisijaisesti siihen tarkoitetuilla painekoelaitteistoilla, mutta lukua voidaan joissain tapauksissa mitata myös rakennuksen omilla ilmanvaihtolaitteilla. Tässä tapauksessa mittausmenetelmää 2 käytetään soveltuvin osin ja tämä vaatii ilmanvaihtolaitteistolta erityisiä ehtoja. (Mts. 10.)

Suomessa yleisimpiä tiiviysmittauslaitteistoja ovat Minneapolis BlowerDoor ja Retrotec tiiviysmittauslaitteistot. Tämän tyyppisillä tiivyyttä mittaavilla valmistetuilla kalibroituilla laitteilla mittaustulos on huomattavasti tarkempi kuin, jos mittaus suoritettaisiin rakennuksen omilla ilmanvaihtojärjestelmillä. (Paloniitty 2013, 30.)

Mittalaitteistoon kuuluvat aina ilmamäärien mittaukselle tarkoitettu puhallin, ovikehikko ja lakana, paine-eromittausyksikkö, ohjausyksikkö sekä paine-eroletkut. Ohessa kuva laitteistosta asennettuna rakennuksen ulko-oveen. (Mts. 30.)



Kuvio 21. Tiiviysmittauslaitteisto asennettuna (Inmeco Oy arkistokuva)

Ilmativiysmittauksen lähtökohtana on, että mittaja on ammattitaitoinen ja laitteet ovat kalibroituja. Ammattitaitoinen mittaja on suorittanut VTT:n sertifiointin: VTT-C-10016-31-13. Tällä tavoin saadaan luotettava tulos ilmativiysmittauksesta. Myös lämpökamerakuvaajalla tulee olla VTT:n sertifikaatti: VTT-C-10017-25-13. (Rakennuksen ilmativeys 2014.)

3.2 Mittauksen rajaus ja alkutiedot

Ennen mittausta tulee selvittää tietoja mitattavasta rakennuksesta. Tiiviyden mittaaminen vaatii, että rakennuksen tiiviyteen liittyvät työt on tehty. Eli höyrynsulku tulee olla asennettuna ja teipattuna, läpivientien tiivistykset on suoritettu, ovet ja ikkunat on asennettu ja tiivistetty ja kaivot ja viemärit on asennettu. Sisäverhoilu vaikuttaa myös tiiviyteen, joten on suositeltavaa, että sekin on tehtynä ennen mittausta. (Paloniitty 2013, 38-39.)

Rakennuksen suunnitelmat olisi tärkeä saada ennen mittauspäivää, jotta mm. tarvittavat laskennat saadaan suoritettua ja ilmanvaihtoreitteihin voi tutustua etukäteen. Esim. arkkitehdin kuvista saadaan selville talon rakenteet sekä mittatiedot ja LVI-suunnittelijalta ilmanvaihtojärjestelmät ja niiden reitit. Ilmanvaihtojärjestelmiin ja kanavien reitteihin on hyvä tutustua ennalta, jotta paikan päällä osaa tukkia vaadittavat ilmareitit. Suunnitelmista tarvitaan mittausta varten lattian pinta-ala, ilmatilavuus sekä vaipparakenteiden pinta-ala.

Mittauksen rajauksessa kannattaa aina pyrkiä koko rakennuksen mittaamiseen. Mitattavaan tilaan otetaan mukaan kaikki tilat, jotka ovat selkeästi ilmanpitävän vaipparakenteen sisäpuolella. Jos mitattavaan tilaan liittyy tila, joka on lämmöneristetty, mutta selkeästi ilmanpitävän vaipan ulkopuolella eikä tilassa ole tiivistä ilmansulkua, on se jätettävä mittauksen ulkopuolelle. Tässä tapauksessa kaikki ilmareitit mitattavasta tilasta tähän tilaan on tiivistettävä. Samaa kaavaa noudattaen, rakennuksen mitattavaan tilaan otetaan mukaan esimerkiksi tekniset tilat ja varastot, jos ne ovat ilmanpitävän vaipan sisäpuolella, riippumatta siitä, ovatko ne lämmitettyjä tiloja tai onko niihin erillinen sisäänkäynti ulkoa. (RT80-10974 2009, 12.)

Rakennuksen ilmatilavuus on huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan lasketun pinta-alan tulo. Rakennuksen ilmatilavuuden laskenta on muuttunut vanhasta standardista (EN 13829) siten, että nykyään ilmatilavuuteen otetaan mukaan myös välipohjat ja alle 160cm olevien tilojen sekä väliseinien tilavuus. Näin ollen saadaan tarkempi tulos rakennuksen todellisesta ilmanpitävyydestä. (SFS-EN ISO 9972:2015.)

Vaipan alaan lasketaan ulkoseinien sisäpinta-ala, sekä ylä- ja alapohjan ala. Mitään aukkoja ei vähennetä vaipan alasta. Rakennuksessa olevia kattojen alaslaskuja tai

muita sisäpuolisia rakennusosia ei myöskään vähennetä vaipan alasta eikä ilmatilavuudesta. (Paloniitty 2013, 50.)

Tässä oli esiteltynä omakotitalojen mittausperusteet, mutta mittauksen rajaus riippuu tietenkin siitä mitä rakennusta mitataan. Kerrostaloja voi mitata kolmella eri tavalla, joko porrashuoneittain, huoneistokohtaisesti tai koko talon mittauksella. Rivitaloja voidaan mitata kahdella tavalla, joko huoneistokohtaisesti tai koko talon mittauksella. Vaipan ala ja ilmatilavuus lasketaan samalla periaatteella kuin pientaloissakin. Esimerkiksi porrashuoneen mittauksessa vaipan alaan lasketaan porrashuonetta ympäröivien seinien sisäpinta-ala, sekä ylä- ja alapohjan ala. Ilmatilavuus on porrashuoneen korkeuden ja kokonaissisämittojen pinta-alan tulo. Kerrostalojen ja rivitalojen mittausperusteita on käsitelty tarkemmin luvussa 3.8.

Mittaukset siis tehdään aina kokonaissisämittojen mukaisesti. Laskennassa tulee käyttää tarkkuutta ja ne suositellaan aina suoritettavan kahdesti, jotta vältetään isoilta laskentavirheiltiltä. Virheet laskennoissa vaikuttavat mittaustulokseen olennaisesti. (Mts. 50.)

3.3 Mittauksen valmistelu

Ennen varsinaista mittausta tulee tehdä ja tarkastaa monta eri tekijää. Tiiviysmittauksessa tarvitaan useita eri välineitä ja laitteita tiiviysmittauskaluston lisäksi:

- Lämpömittari, jolla mitataan sekä ulko- että sisälämpötila
- Teippiä ja muovia, joilla voidaan tukkia mittausta häiritsevät ilmareitit.
- Tiiviysmittauspallo ja pumppu, joilla voidaan tukkia ilmanvaihtokanavat, liesituulettimen poisto ja mahdollisen takan hormi.
- Tietokone ja painekoeohjelma, johon syötetään painekokeeseen tarvittavat tiedot. Ohjelma ohjaa keskusyksikön kautta puhallinta ja piirtää painekokeesta diagrammin sekä laskee q50-luvun.
- Lämpökamera tai merkkisavulaite vuotokohtien paikantamiseen.
- Tikkaat, joilla voi kiivetä katolle tiivistämään ilmanvaihtoventtiilejä ja hormoneja.

(Paloniitty 2013, 34.)

Luotettavan tiiviysmittauksen tekemiseksi tuulen nopeuden tulee olla alle 6 m/s. Koetta ei tulisi suorittaa, mikäli sisä- ja ulkolämpötilojen erotus kerrottuna rakennuksen korkeudella ylittää arvon $500 \text{ m}^\circ \text{C}$, koska tällöin savupiippuilmioilla on liian suuri vaikutus tuloksiin (Mts. 38).

Puhallin tulee asentaa yleensä ulko-oveen, joka on talon suojaisimmassa julkisivun osassa. 1-2 kerroksisissa rakennuksissa voidaan puhallin asentaa kumpaan kerrokseen vain. Puhallin asennetaan kehikkoon ja kehikko asennetaan oveen. Tarvittavat letkut ja liittimet asennetaan paikoilleen ja tietokone kytketään ohjausyksikköön. Mittauslaitteisto on nyt valmis ajettavaksi. (Mts. 39.)

Ennen painekokeenajamista on suoritettava esivalmisteluja. Tiivistystyöllä varmistetaan, että paineistetussa rakennuksessa ei kulje ylimääräistä vuotoilmaa ilmastointikanavien, viemäreiden, liesituulettimen, tulisijan tai vesi- ja viemäri liittymien asennusluukkujen kautta. Rakennuksen kaikki nämä aukot suljetaan ja tiivistetään käyttäen ensisijaisesti tiivistepalloja. Tulppaus voidaan tehdä huoneen puolelta tai talon ulkopuolelta. Viemäreiden osalta on varmistuttava siitä, että vesilukoissa on vettä. Muita esivalmisteluja ovat selvittää rakennuksen ulko- ja sisälämpötilat, ulkoilman ilmapaine, rakennuksen lämmitysmuoto ja tuuliolosuhteet. (Mts. 44-45.)

3.4 Mittaus

Ilmantiiviysmittaus suoritetaan vasta kun kaikki tarvittavat esivalmistelut on tehty. Mittaus suoritetaan ikkunat ja ovet suljettuina. Mittausohjelmaan syötetään tiedot rakennuksesta. Painekekokeessa rakennukseen joko puhalletaan ilmaa tai sieltä puhalletaan ilmaa pois, jolloin rakennuksen sisälle aiheutetaan puhaltimen avulla yli- tai alipaine. Mittaus suositellaan tehtäväksi aina sekä yli- että alipaineisena, jotta saadaan luotettavampi tulos. Tällöin mittaustuloksista otetaan keskiarvo näistä mittauksista. (Paloniitty 2013, 50.)

Ennen varsinaista mittausta suoritetaan manuaalijajo. Tässä ajossa rakennukseen ajetaan 50 Pascalin alipaine. Manuaalisen ajon tavoitteena on mitata, saadaanko kohteeseen riittävä alipaine sekä selvittää, onko rakennuksessa jäänyt tiivistämättä ilmavuotopaikkoja. (Mts. 51.)

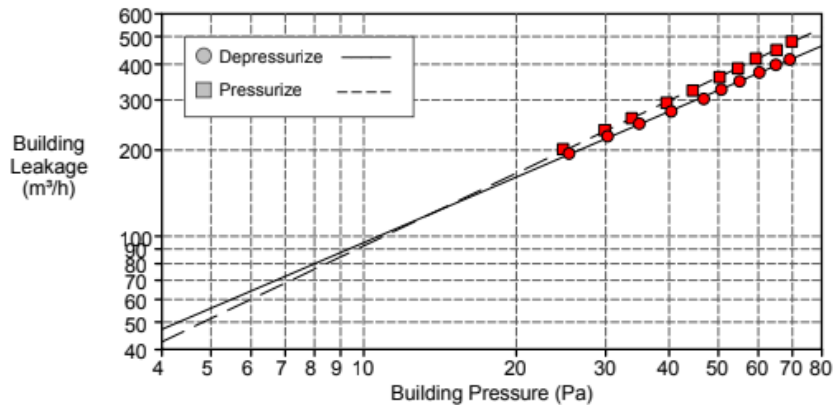
Ennen varsinaista puhallussarjaa puhallinkoneisto mittaa vallitsevan paine-eron rakennuksessa puhallinaukko peitettynä. Kyseisellä mittauksella mitataan savupiippuvaikutuksesta ja tuulesta aiheutuva paine-ero. Tätä paine-eroa kutsutaan lähtöpaineeksi. Lähtöpaineen eron tulisi olla alle 5 Pa. Mikäli tämä arvo kuitenkin ylittyy, voidaan mittauksia jatkaa, mutta tällöin tulee tehdä myös ylipainemittaus. (Mts. 51.)

Tämän jälkeen puhallin ajaa ohjelman läpi. Tietyn väliajoin puhallin mittaa ilmavirtauksen, kuitenkin vähintään viisi kertaa. Mittauslaite mittaa puhaltimen akselin ympäriltä paine-eroa, josta se mittaa läpi virtaavaan ilmamäärän kullakin paine-erolla. Puhallussarjan lopuksi suoritetaan loppupaineen mittaus, jossa puhallinaukko on jälleen peitettynä. Kokeen tulos ei ole hyväksyttävä, mikäli lähtö- ja loppupaineen ero on yli 5 Pa. Tällöin tulee mittaus suorittaa uudelleen. (Mts. 52.)

Mittauksen päätyttyä ohjelmisto mallintaa tietokoneelle tämän tiedon pohjalta rakennuksen ilmapuotokäyrän. Liite 1. Tämän jälkeen puhallin käännetään ja tehdään sama mittaus ylipaineella. (Mts. 52.)

Molemmista mittauksista ohjelmisto laatii puotokäyrät ja rakennuksen ilmanvuotoluuku on ali- ja ylipainemittauksen tulosten keskiarvo. Mittaus uusitaan, mikäli mittaus tulokset poikkeavat toisistaan yli $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$. Mikäli tulokset poikkeavat vielä toisenkin mittauksen jälkeen yli sallitun arvon, käytetään tällöin rakennuksen ilmanvuotolukuna arvoista suurempaa lukua. (Mts. 54.)

Ohjelma laskee mittausarjasta puotokäyrän ja siitä kuvaajan, jossa paine-ero asteikko ja ilmapuotoluku asteikko ovat logaritmiset. Mittausohjelmisto määrittää itse keskiarvon näistä käyristä ja kertoo mikä on puotoilmapuotoluku 50 Pa:n paine-erossa. (Mts. 55.)
Kts. kuvio 22.



Kuvio 22. Ilmavuotokäyrä, josta ilmenee ilmamäärä paine-eron suhteen yli- ja alipaineessa. (Inmeco Oy arkistokuva)

3.5 Virheet

Jokaiseen mittaukseen sisältyy aina jonkin verran virheitä. Mittauksen suorittajan tulee olla pätevä työhön ja mikäli mittaustulos on epäilyttävä, tulee mittaajan toistaa mittaus, tai tulos täytyy tarkistaa. Mittausvirheet koostuvat yleensä ilmamäärän mittausrvirheestä sekä rakennuksen suureiden mittaus-/laskentavirheistä. Ilmamäärän mittausrvirhe on yleensä melko pieni ja se lasketaan ohjelmistossa, joka perustuu mitaussarjan tulosten keskihajontaan. Suurempaa virhettä taas syntyy yleensä rakennusten suureiden määrittämisessä, jossa virheprosentti saattaa olla jopa 10 prosenttia. Tiiviysmittaajan tulisi arvioida lopullinen virhe ottaen huomioon ulko-olosuhteet, suureiden mittausrvirhe, ilmamäärän mittausrvirhe ja tiivistämisestä tulleet virheet. (Paloniitty 2013, 56-57.)

Tiiviysmittaajan tulee huolehtia siitä, että mittausrlaitteisto on kalibroitu ja kalibrointitodistus on voimassa. Tyypillisesti laitteet tulee kalibroida seuraavien ohjeiden mukaisesti:

- painekoelaitteisto 2 vuoden välein
- virtaus- ja paine-eromittarit 2 vuoden välein
- lämpötila-anturit 4 vuoden välein

Jos laitteisto vaurioituu, on kalibroinnit aina suoritettava uudestaan vaurion korjauksen jälkeen. (RT 80-10974 2009, 13.)

3.6 Vuotokohtien paikantaminen

Tiiviysmittauksella ei pelkästään selvitetä ilmanvuotolukua, vaan usein myös kartoitetaan rakennuksen vuotokohdat. Vuotokohtien paikannus tehdään usein merkisavuin tai lämpökameralla. Vuotokohtien paikannus on tärkeää, mikäli halutaan korjata mahdolliset ilmanvuotoreitit.

Vuotokohtien paikantaminen rakennuksissa on olennainen osa tiiviysmittausta, vaikka se usein jätetäänkin tekemättä. Mikäli vuotokohtia ei paikanneta, on vaarana, että mittaukset joudutaan suorittamaan uudelleen. Varsinainen ilmavuotojen raportointi tehdään, jos se on tilaajan kanssa sovittu. Yleisin tapa on, että ilmavuotoja ei tarvitse paikantaa, mikäli rakennus täyttää sille asetetun tason. Jos tiiviys ei ole riittävä, tulee ilmavuodot paikantaa ja dokumentoida. (Paloniitty 2013, 58.)

Vuotojen paikannuksen periaatteena on, että tilaan aiheutetaan alipaine, yleensä 30 Pa. Tämän jälkeen vuotokohdat paikannetaan joko merkisavuin tai lämpökameralla. Lämpökamerakuvaus on tehokkain tapa selvittää ilmavuotoja. Usein myös aistinvarainen, iholla tuntuva veto, on selvin ja helpoimmin havaittava merkki ilmavuodosta. Menetelmiä käytetään usein yhdessä, kun kartoitetaan tarkasti rakennuksen ilmatii- viyttä. (Mts. 58.)

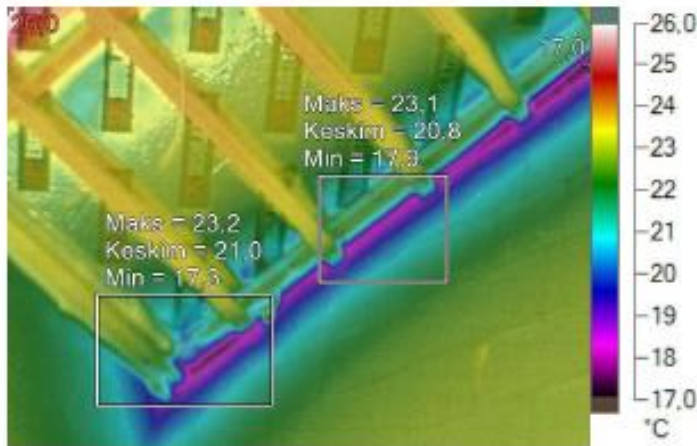
Tyypillisimpiä ilmavuotokohtia ovat ikkuna- ja oviliittymät, ulkoseinän liittymät muihin rakenteisiin, pistorasiat ja kaikki ilmansulun reiät (Paloniitty 2004, 33-34).

3.6.1 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus on tarkka ja puolueeton mittausmenetelmä. Lämpökuvauksella voidaan nopeasti havaita rakenteita rikkomatta, onko kyseessä heikko eristys, ilma- vuoto, kylmäsilta tai joissakin tapauksissa jopa kosteusvaurio. (Paloniitty 2004, 27.)

Etsittäessä rakennuksen ilmavuotoja lämpökuvauksella, on tärkeää ymmärtää rakennuksen vallitsevat painesuhteet. Rakennuksen ilmavuodot kuvataan, kun rakennuk-

seen aiheutetaan alipainetta. Tällöin vuodot aiheuttavat lämpötilaeron vuotokohdan ympärille. (Mts. 32.) Kts. kuvio 23.



Kuvio 23. Esimerkki ilmapuoto omakotitalon yläpohjan ja ulkoseinän liittymässä (Inmeco Oy arkistokuva)

Huono puoli lämpökamerakuvauksessa on, ettei sitä voida tehdä missä olosuhteissa vain. Mikäli lämpötilaerot menevät hyvin pieniksi rakennuksen sisä- ja ulkopuolilla, ei kuvausta voida luotettavasti suorittaa. Lämpötilaeron ollessa alle 5 astetta, ei vuotojen paikannus ole enää helppoa eikä luotettavaa. (Paloniitty 2013, 58.)

Rakennusten lämpökuvauksessa tulee käyttää kameroita, jotka antavat pintojen lämpötilajakauman ja kameran rungon lämpötilavaihtelut eivät vaikuta mittaustuloksiin. Kuvassa on esitetty yksi tyypillisimmistä lämpökameramalleista. Kamerassa tulee olla myös kuvien tallentamismahdollisuus, jotta kuvia voidaan käyttää myöhemmin raportoinnissa ja analysoinnissa. (RIL 255-1-2014, 371-372.)



Kuvio 24. Esimerkki lämpökamerasta (Fluke TiS45-lämpökamera 2018).

Rakennuksen lämpökuvauksen tuote on raportti tehdystä mittauksesta, joka sisältää analyysin lämpökuvista ja tämä tulee antaa tilaajalle tiiviysmittauksen raportin yhteydessä.

3.6.2 Merkkisavu

Vuotokohtia voidaan paikantaa myös merkkisavun avulla. Merkkisavu on paksua valkoista savua, jonka avulla voidaan selvittää vuotokohdissa ilmavirtauksen voimakkuutta ja suuntaa hetkellisesti. Merkkisavua käytetään aistinvaraisen arvioinnin tukena. Merkkisavumenetelmässä käytössä on savupullo tai -kynä, josta savua tupsutetaan haluttuun kohtaan. Tutkittavan tilan ollessa alipaineistettu, savu pyrkii huonetilaan päin ilmavuotokohdissa. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. 2016, 60-61.)

Merkkisavuilla tutkitaan yleensä seuraavia kohtia:

- lattian ja seinät vierustat
- katon ja seinän rajakohdat
- pistorasiat
- valaisimien ympäristöt
- ikkunoiden ja ovien liittymät ja tiivisteet

(Paloniitty 2013, 59.)



Kuvio 25. Ilmavuotojen paikannus merkkisavulla (Ilmatiiveyden varmistaminen 2018).

Merkkisavun kanssa tulee olla varovainen, jotta se ei laukaise rakennuksen mahdollisia palohälyttimiä (Paloniitty 2013, 59).

3.7 Raportointi

Ilmanpitävyydestä sekä vuotokohdista laaditaan aina vähintään mittauspöytäkirja, mutta usein myös raportti, jossa esitetään seuraavat tiedot:

- kansilehti, jossa ilmoitettu ilmanvuotoluvun arvot q50 ja n50 0,1 tarkkuudella sekä tiiviysmittauksen energialuokka
- mittauksen tekijän tiedot
- mittausaika
- rakennuksen tunniste- ja laajuustiedot
- säätiedot
- mittauksen tavoite ja kattavuus
- käytetty laitteisto
 - o kalibrointitiedot
- mittaustulokset
 - o lämpötilat
 - o mitatut vuotoilmavirrat
 - o ilmanpaine
 - o mittauspaine-erot
- tiivistysmenetelmät ja tiivistyspaikat
- laskettu vuotoilmavirta 50 Pa:n paine-erolla
- vuotoilmakäyrät
- lasketut ilmanvuotoluvun arvot q50 ja n50
- arvioitu virhetoleranssi
- havainnot ja johtopäätökset

(RT80-10974 2009, 13.)

Tutkimuksen liitteessä 1 on esitetty esimerkkiraportti, jonka kaltaisia tässä tutkimuksessa on käytetty tietojen keräämiseen.

3.8 Suurten rakennusten ilmatiiviyden mittaus

Suurten rakennusten tiiviysmittaus tehdään samoilla periaatteilla kuin pienempienkin rakennuksien mittaus. Suurempia rakennuksia ovat kerrostalot, toimistorakennukset, liikekiinteistöt, tuotantotilat ja julkiset rakennukset. Standardissa määrite-

tään, että suuriksi rakennuksiksi lasketaan kaikki ne, joiden tilavuus on yli 4000 m³. Suurten rakennuksien tiiviysmittauksiin liittyy muutamia erityisohjeita, joita jäljempänä esitellään. Mittaus voidaan tehdä tiiviysmittauslaitteistolla tai rakennuksen omalla ilmanvaihtojärjestelmällä, mutta näissäkin suositellaan käytettäväksi tiiviysmittauskaloja, jotta mittauksen virheprosentti saadaan pienemmäksi. (Paloniitty 2013, 65.)

Kaupalliset tiiviysmittauslaitteistot on lähtökohtaisesti suunniteltu kohteisiin, joissa ilmantilavuus on suhteellisen pieni. Joten suurten rakennusten tiiviysmittauksessa täytyy käyttää useampaa laitteistoa. Mittaukseen tarvittavan puhaltimen/puhaltimien kapasiteetti voidaan laskea kertomalla kohteen tilavuus suunnitellulla ilmanvuotoluvulla. Kun käytetään useampaa ja isompia laitteistoja, tulee mittauksen tekijöitäkin olla enemmän. (Mts. 66.)

3.8.1 Rivitalot

Rivitalojen tiiviysmittauksessa mitataan yksittäisten asuntojen tiiviys, samoilla periaatteilla kuin pientaloissakin. Tuloksista lasketaan keskiarvo, joka on rakennuksen ilmanvuotoluku. Mitattavia asuntoja tulee olla vähintään 20 prosenttia kaikkien asuntojen määrästä. Tämän lisäksi jokaisesta erillisestä rakennuksesta tulee mitata vähintään yksi asunto. Mitattavan huoneiston tulisi olla päätyhuoneisto, jotta mitattavassa tilassa olisi mahdollisimman paljon ulkovaippaa. (Paloniitty 2013, 76-77.)

Normaalisti rivitalohuoneiston mittauksessa vuotoilmassa ovat mukana myös asuntojen välisten rakenteiden ilmapuodot. Jos halutaan selvittää rivitalon pelkän ulkovaipan ilmapuotoluku, on viereiset huoneistot paineistettava samaan paineeseen kuin mitattava asunto. Tällä estetään ilman virtaus huoneistojen välisten seinien läpi. (RT 80-10974 2009, 13.)

3.8.2 Kerrostalot

Asuinkerrostaloissa tiiviysmittaus voidaan suorittaa kolmella eri tavalla. Ilmanpitävyys mitataan joko koko rakennuksesta, yksittäisistä porrashuoneista tai yksittäisistä huoneistoista. Mikäli mittaus tehdään yksittäisistä huoneistoista tai porrashuoneistoista, kerrostalon ilmanpitävyys on saatujen tulosten keskiarvo (RT 80-10974 2009, 14.)

Yksittäisten huoneistojen tiiviys mitataan samoilla menetelmillä kuin pientaloissakin. Mitattavia asuntoja tulee olla 20 prosenttia kaikkien asuntojen määrästä. Huoneistot tulee mitata eri kerroksista, vähintään yksi alimmasta ja ylimmästä kerroksesta ja lisäksi mitataan yksi huoneisto joka toisesta välikerroksesta. Yksittäisten huoneistojen mittauksessa ei eritellä ulkovaipan ja huoneistojen välisiä ilmapuotoja, joten on suositeltavaa mitata koko porrashuoneen tai koko rakennuksen ilmanpitävyys. (Mts. 14.)

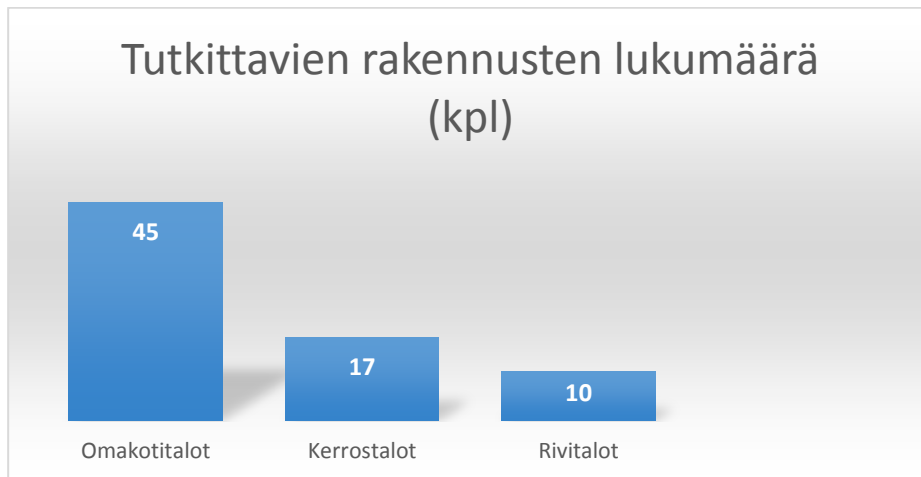
Porrashuonemittauksessa kaikkien huoneistojen ovet rappukäytävään pidetään auki. Mittauslaitteistot asennetaan rappukäytävän ulko-oveen tai jonkin huoneiston parvekeoveen. Rappukäytävän osalta ongelmallista on selvittää kaikki suljettavat ilma-reitit. Mitattavaa aluetta suunniteltaessa pyritään ottamaan kaikki tilat mukaan mittaukseen, varastot, kellarit yms. Vain poikkeustapauksissa jätetään jotain ulkopuolelle, esim. autohallit. (Paloniitty 2013, 79-80.)

Koko rakennuksen tiiviysmittaus on paras ja suositeltavin tapa, koska silloin saadaan mitattua nimenomaan ulkovaipan ilmapuodot, mikä kuvaa parhaiten vuotoilman energiankulutusta (Mts. 79).

4 Tutkimustulokset

Tutkimus toteutettiin keräämällä toteutunutta tiiviysmittaustietoa tutkimuksen tilaajalta Inmeco Oy:ltä. Kaikki tutkimuksessa olleet tiiviysmittaukset on toteutettu teoriaosan luvun 3 esitellyn painekokeen mukaisesti. Mittauslaitteistona on käytetty Minneapolisin valmistamaa tiiviysmittauslaitteistoa sekä kannettavaa tietokonetta, johon on asennettuna mittausta automaattisesti ohjaava tietokoneohjelma. Mittaukset on suoritettu standardin SFS EN 13829 mukaisesti.

Mittausraportteja oli yhteensä 72 kpl (kuvio 26) käsittäen 10 rivitaloa, 17 kerrostaloa ja 45 omakotitaloa. Rakennusten rakennusvuodet sijoittuvat vuosille 2010-2017.



Kuvio 26. Kaaviossa esitetty tutkittavien rakennusten lukumäärä rakennustyypeittäin

Mittausraportit ovat dokumentoituina Inmeco Oy:n tietokantaan. Tutkimusta varten on laadittu Excel-taulukko, johon on kerätty kaikista raporteista tutkimukseen haluttu tiedot (liite2). Taulukon avulla on muodostettu kuvaajia selkeyttämään tuloksien vertailuja.

Tiiviysmittaustiedot tutkittavista raporteista on jaoteltu seuraaviin ryhmiin rakennustyypeittäin:

- pientalot (omakoti- ja paritalot)
- rivitalot
- kerrostalot

Rakennuksista on kerätty liitteen 2 mukaisesti tietoja.

Kaikki rakennukset on lisäksi jaoteltu seuraavasti:

- rakennusvuosi
- kerrosten lukumäärä
- runkotyyppi
- lämmitystapa
- rakennustapa (elementti vai "pitkästä tavarasta tehdyt")
- rakennusyritys.

Pientalojen osalta tuloksia on määritetty tarkemmin kuin rivitaloista tai kerrostaloista. Tämä johtuu siitä, että pientalojen dokumentteja oli paljon enemmän kuin muita, joten tulokset ovat siten vertailukelpoisempia.

Pientalojen tuloksista määritettiin:

- ilmanvuotolukujen keskiarvot vuosittain
- kerroslukumäärien vertailua
- runkorakenteiden erot
- elementtirakenteiset vs. pitkistä tavarasta tehdyt
- vuotokohtien kehitys, erot vuodesta 2010 nykypäivään.

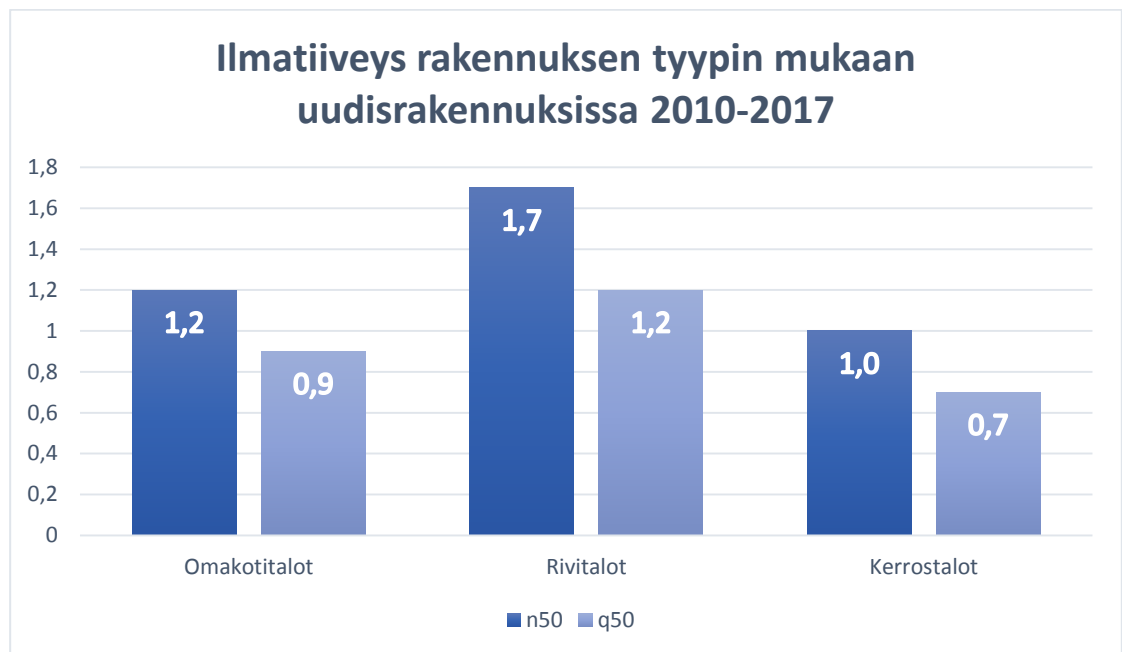
Kerrostaloista on määritetty yleisimpiä vuotokohtia sekä vuosittainen vertailu ilmanvuotoluvuista. Myös kahden eri yrityksen rakentamien talojen ilmanvuotolukuja on vertailtu keskenään.

4.1 Kokonaisvertailua talotyypeittäin

Tutkimuksessa on koottuna vertailua ilmatiiviyslukujen osalta talotyypeittäin (kuvio 27). Kuvaajan perusteella kerrostalojen ilmatiiviyys on huomattavasti parempi kuin pientaloissa tai rivitaloissa. Kerrostalojen ilmatiiviyysluvun tulisikin olla parempi kuin pienataloissa, sillä betonirakenteiset talot ovat hyvin ilmatiiviitä rakenteensa vuoksi. Tuloksissa mielenkiintoista on kerrostalojen q50-luvun alhaisuus verrattuna n50-lukuun. Teoriaosassakin on käyty läpi luvussa 2.2., että ilmatiiviyden mittauksen laskentaperusteissa tuli muutoksia vuonna 2012. Tuolloin n50-luvusta siirryttiin q50-lukuun nimenomaan sen vuoksi, että suuret rakennukset saivat geometriansa vuoksi parempia tuloksia n50-luvulla kuin q50 luvulla ja tämän vuoksi ilmanvuotolukujen ei katsottu olevan luotettavia. Tässä tutkimuksessa kerrostaloilla n50-luvun keskiarvo on 1,0 (1/h) ja q50-luvun 0,7 [$\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$]. Tulokset siis kertovat, että n50 luvulla tulokset ovat siis huonompia kuin q50 luvulla. Tuloksista on myös nähtävillä, että kerrostalojen ja pientalojen n50 ja q50 suhde on melko sama. Oliko siis laskentatapojen muutos tarpeellinen? Tutkimuksessa oli mukana vain 17 kerrostaloa, joten tämä ei ole täysin luotettava arvio. Luotettavaa vertailua varten mitattavia kohteita pitäisi olla enemmän.

Rivitalojen ilmatiiviyysluvut olivat todella korkeat verrattuna muihin. Rivitaloilla n50-luvun keskiarvo on 1,7 (1/h) ja q50-luvun 1,2 [$\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$]. Pientaloilla taas n50-luvun keskiarvoksi on saatu 1,2 (1/h) ja q50-luvun 0,9 [$\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$]. Tähän vaikuttaa var-

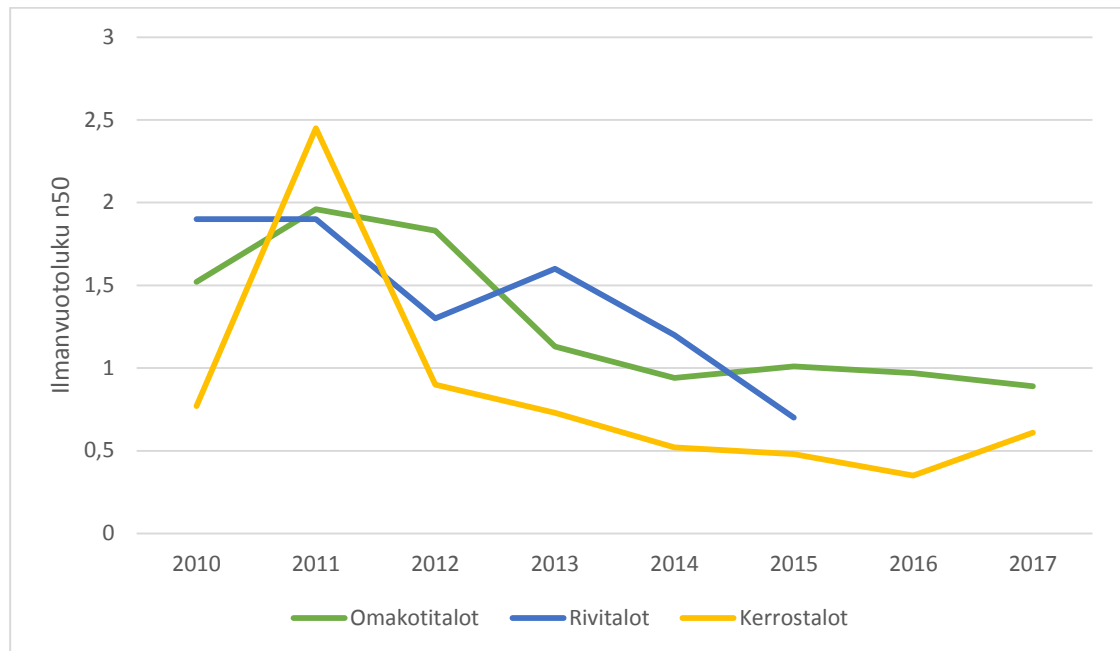
masti olennaisesti se, että rivitaloja oli vain 10 kappaletta tutkimuksessa, kun taas pientaloja 45 kappaletta. Pientalojen lukemat ovat siis paljon luotettavampia kuin rivitalojen. Tutkimuksessa olevat rivitalot on pääsääntöisesti rakennettu kevytsoraharkoilla, joten tällä saattaa olla jotain vaikutusta huonompaan ilmanvuotoluvun arvoon. Puurunkoisia ja kevytsoraharkkorakenteisia rakennuksia on vertailtu keskenään seuraavassa luvussa tarkemmin.



Kuvio 27. Ilmanvuotolukujen keskiarvot eriteltyinä rakennustyyppin mukaan.

Seuraavaksi on otettu vertailun perusteeksi rakennuksien rakennusvuodet. Eli ilmanvuotoluvut on eroteltu vuosittain vuodesta 2010, vuoteen 2017 saakka (kuvio 28).

Vuosittaisessa vertailussa on otettu huomioon ainoastaan ilmanvuotoluku n50. Tämä johtuu siitä, että ennen vuoden 2012 kesää ei ole mittauksessa huomioitu q50-lukua, joten vertailemalla n50-lukuja, saa paremman yleiskuvan kehityksestä.



Kuvio 28. Ilmanvuotoluvun kehityskaari vuosittain eriteltyinä rakennustyypeittäin.

Kehityskaari näyttää, että parantumista on saatu aikaan, etenkin pientaloissa. 2012-2013 vuosina on tullut selvä loikkaus parempaan. Tähän osaltaan varmasti vaikuttaa kesän 2012 muutokset ilmatiiviytluvun mittausperusteisiin. Tällöin on varmasti alettu kiinnittämään huomiota enemmän rakennuksen ilmatiiviyteenkin. Kerrostalojen osalta vuoden 2011 korkea lukema johtuu siitä, että sinä vuonna kerrostaloja mitattiin vain 3 kpl ja niistä yhden kerrostalon lukema oli todella huono, n50-luku oli yli 4,0 (1/h). Tällä oli siis suuri vaikutus vuoden tulokseen ja tämä ei ole luotettava keskiarvo vuodesta 2011. Ilmanvuotoluvun pieni nousu vuonna 2017 kerrostaloilla selittyy myös sillä, että yhdellä kerrostalolla oli sinä vuonna paljon huonompi lukuarvo kuin muilla ja se vaikuttaa paljon sen vuoden tulokseen. Kerrostalojen osalta muuten näyttää siltä, että viime vuosina on pysytty melko samoissa lukemissa. Ilmanvuotoluvun ollessa noin 0,6 (1/h), on jo todella hyvä tulos ja tuskinpa tästä enää ilmatiiviyden osalta voidaan paljon paremmaksi mennäkään.

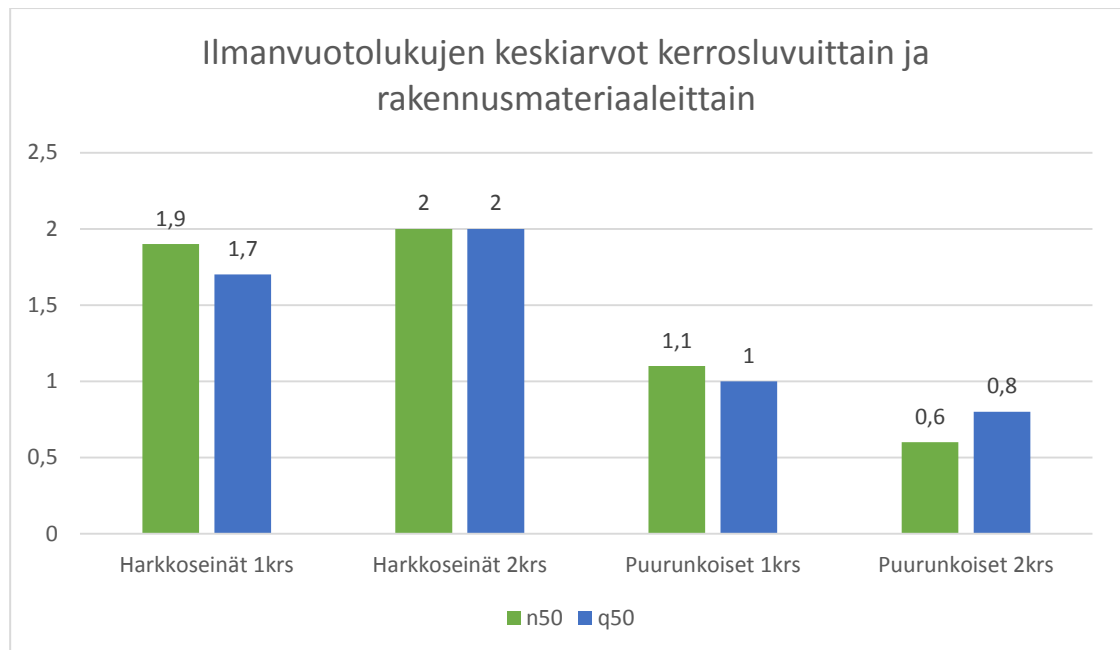
Rivitalojen kohdalla on myös menty laskusuuntaan vuotoluvuissa. Rivitalojen hyvät vuosina 2011-2013 johtuu rivitalojen vähäisestä määrästä tutkimuksessa. Yksikin huono tai hyvä tulos vaikuttaa koko vuoden tulokseen paljon. Kuitenkin voisi päätellä, että myös rivitalojen osalta ollaan vuotoluvut saatu laskusuuntaan.

Kaikkein luotettavimpia tuloksia ovat pientalojen lukemat. Niitä on tutkimuksessa selkeästi enemmän kuin muita talotyyppisiä, joten niiden osalta tulokset ovat varsin

luotettavia. Omakotitaloissa viime vuosina ilmanvuotoluku on ollut keskiarvoltaan noin 1,0 (1/h), mikä on kiitettävä tulos. Se toteuttaa myös määräysten suositusarvon.

4.2 Pientalot

Seuraavaksi on keskitytty tarkastelemaan pientaloja erikseen. Ensimmäiseksi tarkastelua on tehty rakennusten kerrosluvun mukaan ja siihen on yhdistettynä vielä se, mistä materiaalista pientalot on rakennettu (kuvio 29). Kevytsoraharkkorakenteisia taloja tarkastelussa oli yhteensä 8 ja puurakenteisia 37. Harkkorakenteisissa taloissa yksikerroksisia oli 3 kpl ja kaksikerroksisia 5 kpl. Puurakenteisissa yksikerroksisia oli 26kpl ja kaksikerroksisia 11kpl. Jatkossa puhuttaessa harkkorakenteista tarkoitetaan harkoilla nimenomaan kevytsoraharkkoja.



Kuvio 29. Vertailu kerroslukujen ja materiaalien suhteen

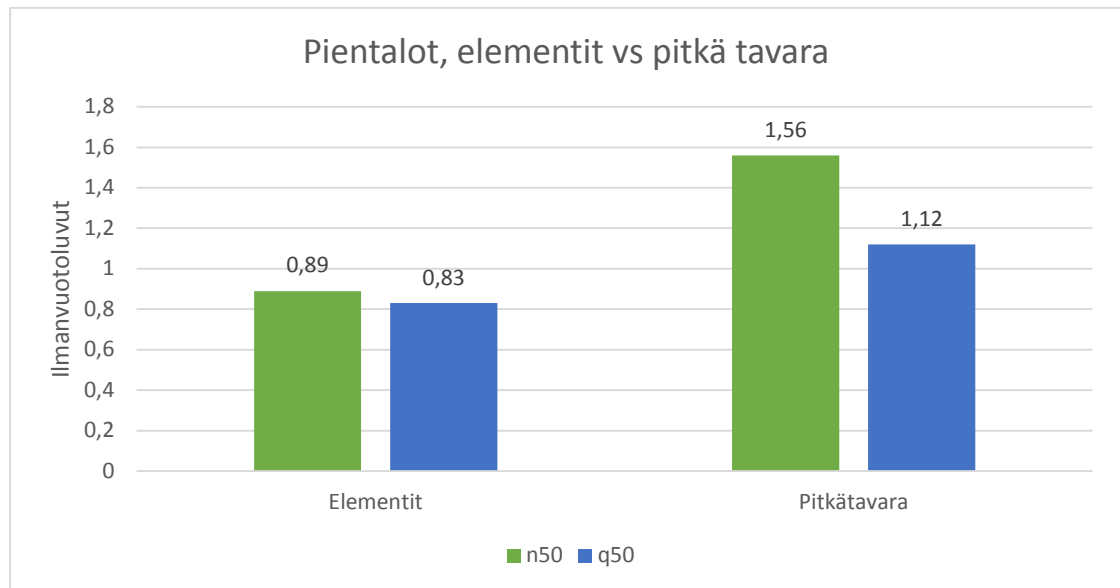
Puurakenteisten talojen osalta tulos on yllättävä. Yleensä ottaen 2-kerroksiset talot ovat heikompia ilmanvuotoluvultaan kuin 1-kerroksiset, johtuen usein siitä, että välipohjan ja ulkoseinän liitosta on monesti hankala toteuttaa ja siinä vaaditaan äärimmäistä huolellisuutta ja hyvää suunnittelua. Usein detaljeista on nähtävissä, ettei välipohjan ja ulkoseinän liitosta ole mitenkään suunniteltu ja tällöin rakentajat itse joutuvat tekemään myös suunnittelutyön tämän osalta ja aina se ei ole sama asia kuin suunnittelija sen ammattitaitoisesti suunnittelisi.

Tuloksissa puurakenteisille 1-kerroksisille ilmanvuotoluvun n_{50} keskiarvo on 1,1 (1/h) ja q_{50} -luvun $1,0 \text{ [m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$. Kun taas 2-kerroksisilla n_{50} -luku on 0,6 (1/h) ja q_{50} -luku $0,8 \text{ [m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$. Eli eroa on muutama kymmenys. 1- ja 2-kerroksisia taloja ei ollut tutkimuksessa yhtä paljon, joten sen vuoksi tulos ei ole täysin luotettava. Yhtenä syynä erolle voi olla se, mikäli 2-kerroksisista taloista suurin osa rakennettu elementein. Tällöin parempi lukuarvo olisi selitettävissä. Toisena syynä voi olla se, että 2-kerroksisilla taloilla on usein enemmän ilmatilavuutta/vaipan alaa ja yksittäiset pienemmät ilmavuodot eivät tällöin välttämättä vaikuta ilmanvuotolukuun niin merkittävästi kuin pienemmissä 1-kerroksisissa taloissa.

Puurunkoiset rakennukset kokonaisuudessaan menevät ilmatiiviyslukuarvon 1 pintaan, joten kokonaisuudessaan kaikki nämä ovat hyviä arvoja puurunkoisille taloille. Puurakenteisia taloja on tehty jo vuosisatoja, joten puurakentamisen pitäisikin olla jo hallussa rakentajilla. Höyrynsulkuakin on puurakenteisissa käytetty jo usean vuosikymmenen ajan, joten taitoa tähänkin jo löytyy. Puutaloja tehdään myös paljon elementtirakenteisia, joten tämäkin varmasti vaikuttaa osaltaan hyviin ilmanvuotolukuihin. Seuraavassa kuvaajassa on tarkasteltu paremmin elementtirakenteisia taloja.

Kevytsoraharkkorakenteisien rakennusten ilmanvuotoluvut olivat selvästi huonompia kuin puurunkoiset. Harkkorakennuksilla ilmanvuotoluvut 1- ja 2-kerroksisilla taloilla olivat noin $q_{50}=2,0 \text{ [m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$. n_{50} ja q_{50} lukujen välillä ei ole havaittavissa kovinkaan suurta hajontaa. Harkkorakenteisissa taloissa ei kerroslukujenkaan välillä ole huomattavaa eroa. Näissä 2-kerroksiset antavat hieman huonompia arvoja kuin 1-kerroksiset. Huonoon ilmanvuotolukuun harkkorakenteisten osalta saattaa vaikuttaa se, että kevytsoraharkko ei itsessään ole ilmatiivis ilman ilmatiivistä rappauserrosta tai muuta pinnoitekerrosta. Tätä on käsitelty teoriaosassa luvussa 2.4.3. Harkkorakenteisissa seinissä suurin vaikeus on saada rappauserroksen liitoskohdat ilmanpitäviksi. Liitokset tulisi toteuttaa niin, että ilmavuotokohtaa ei synny. Haasteena on saada varsinkin yläpohjarakenne ja ulkoseinärakenne liittymään hyvin. Tämä vaatii kunnollista suunnittelua ja huolellista tekemistä. Myös rappauserroksen paksuus saattaa vaikuttaa ilmanpitävyyteen.

Seuraavassa tarkastelussa on vertailtu pientaloja sen mukaan, onko ne rakennettu elementeistä vai pitkästä tavarasta (kuvio 30). Tulosten perusteella elementeistä rakennetut talot ovat selkeästi parempia tiiviydeltään kuin pitkästä tavarasta tehdyt.

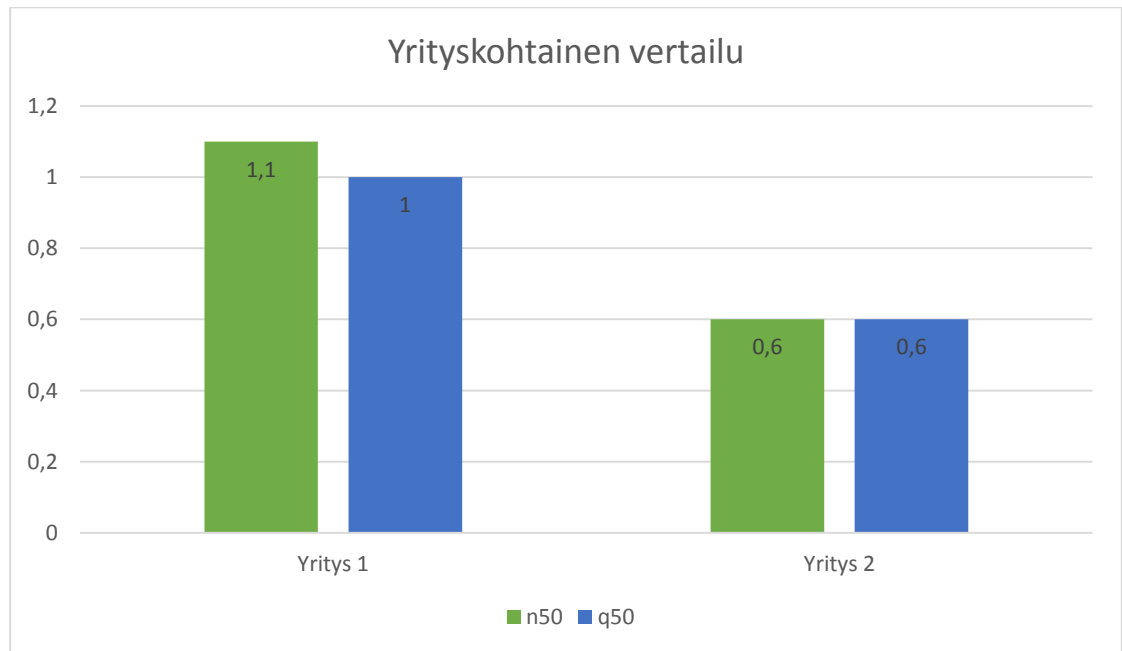


Kuvio 30. Kuvaajassa on esiteltyä pientalojen ilmanvuotolukujen keskiarvot rakennustavan mukaan.

Tulos on mielenkiintoinen, selkeää oikeaa vastausta ei ilmanvuotolukujen eroihin löydy. Yksi hyvä syy tähän saattaa olla se, että elementtirakenteiset talot rakentavat yleensä joku talovalmistaja tai asiantunteva rakennusyritys. Heillä on usein määritetty ilmanvuotoluvut jotka he lupaavat asunnonostajalle, eli heidän on pakko pyrkiä toteuttamaan talot niin, että sopimuksessa määritetty luku varmasti toteutuu. Pitkästä tavarasta tehdyt talot taas monesti saattavat toteuttaa omistaja itse. Heillä ei välttämättä ole minkäänlaista tietoa taikka osaamista rakentamisesta. Talon rakentamiseenhan ei ole lakia määritetty, että ne pitäisi rakentaa ammattilaisen avulla. Joten asiasta tietämättömät eivät välttämättä kiinnitä huomiota esim. höyrynsulun tiiviyyteen ja tiiviystyöt voidaan suorittaa huonolla asenteella, kun ei tiedetä mihin tiiviiden puutteet saattavat vaikuttaa ja johtaa.

Tutkimuksen tilaajalla on muutamia yrityskumppaneita, jotka toistuvasti tilaavat ilmatiiviysmittauksia. Seuraavassa kuvaajassa on eritelty kahden yrityksen rakentamia taloja keskenään ilmanvuotolukujen osalta (kuvio 31). Molempien yritysten rakentamat talot ovat puuelementtirakenteisia, joten rakenteellisia eroja ei juurikaan pitäisi olla. Erot ovat huomattavia. Yrityksellä 1, ilmanvuotoluvut ovat noin 1,0, kun taas yrityksellä 2 ilmanvuotoluvut ovat 0,6. Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä yrityksellä 1 vertailuun otettavia rakennuksia oli 10 ja yrityksellä 2 rakennuksia

oli 4. Joka tapauksessa tuloksissa on nähtävissä, että vaikka rakennetyyppi ja runko olisivatkin samanlaisia, on rakentajalla väliä.



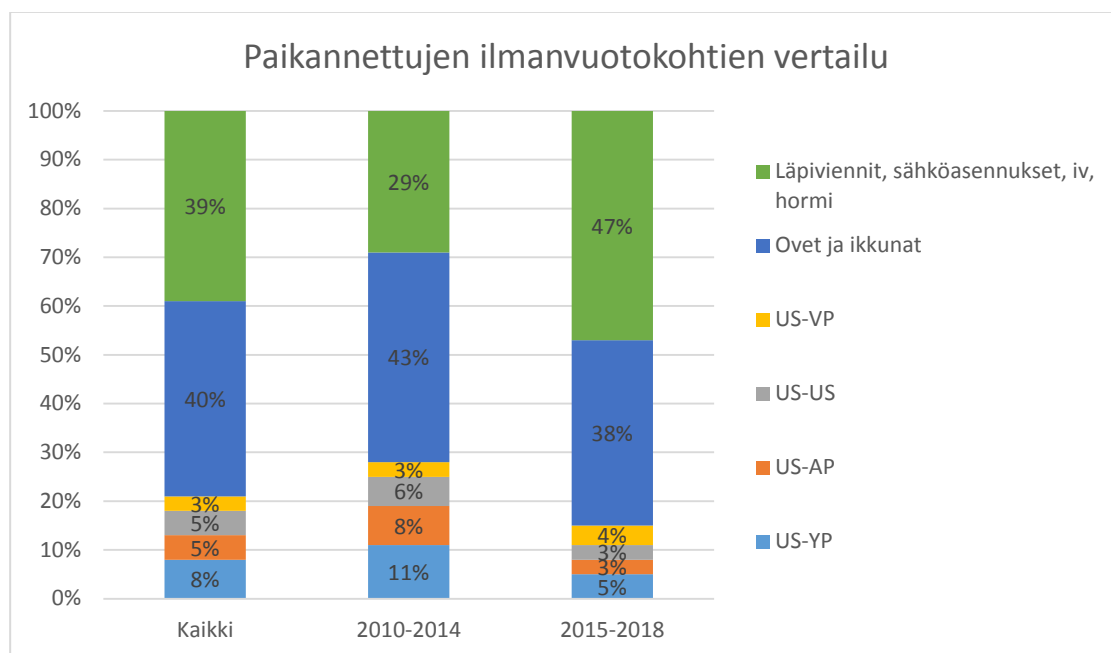
Kuvio 31. Yrityskohtainen vertailu

4.2.1 Pientalojen vuotokohtat

Tiiviysmittauksien yhteydessä on suoritettu myös vuotokohtien paikannusta. Vuotokohtia on paikannettu mittauskohteissa merkkisavuun tai lämpökameralla. Kaikista tutkimuksessa olleista kohteista ei ole paikannettu vuotokohtia. Vuotokohtia on paikannettu yhteensä 36 pientalosta, joista 15 lämpökameralla ja 21 merkkisavuun. Vuotokohtien paikannuksessa tilat on kierretty kauttaaan ja etsitty ilmanvuotokohtia. Lämpökameralla paikannetut vuotokohtat ovat hieman tarkempia kuin merkkisavuun paikannetut. Lämpökamerakuvauksessa yhtenä epävarmuustekijänä se, onko kyseessä ilmanvuotokohta vai lämmöneristeen puute. Merkkisavuissa tutkitaan aistinvaraisesti, joten se ei anna täysin luotettavaa tulosta, eikä sillä voida havaita ihan kaikkia vuotokohtia. Mikäli halutaan täysin tarkka vuotokohtien paikannus, on silloin käytettävä merkkiainetutkimusta.

Kohteiden kesken tehtiin vertailu paikannettujen ilmanvuotokohtien sijainneista (kuvio 32). Vertailussa ei ole eriteltyä lämpökamerakuvausta ja merkkisavuun tehtyä paikannusta. Vertailussa on eriteltyä vuosien 2010-2014 ja 2015-2018 vuotokohtat. Näin päästään näkemään, onko vuotokohdissa tapahtunut minkäänlaista kehitystä

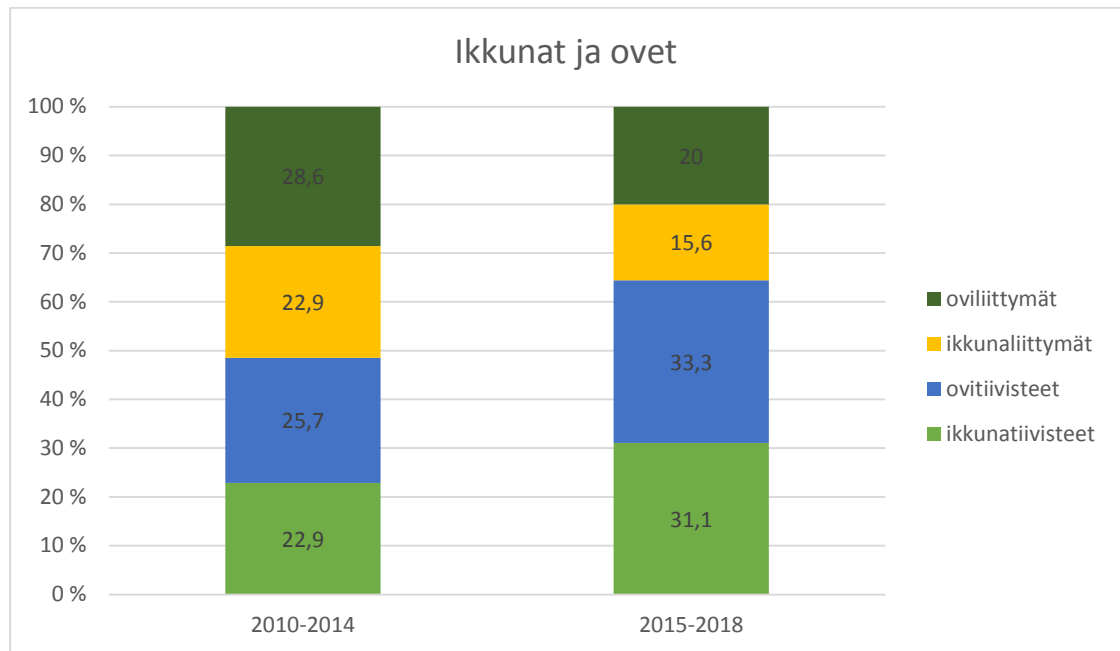
vuosien varrella. Vertailusta käy ilmi, että suurin osa vuotokohtista sijaitsi läpivienneissä sekä ovissa ja ikkunoissa. Ulkovaipan liittymäkohdissa vuotoa on n.20 % kaikista ilmavuodoista.



Kuvio 32. Vuotokohtien vertailu

Vuosittaisessa vertailussa syntyi eroja kaikkien vuotokohtien osalta. Läpivientien osuus vuodesta 2010-2014 oli 29%, kun taas vuosina 2015-2017 osuus nousi 47 prosenttiin. Ovien ja ikkunoiden osuus vuosina 2010-2014 oli 43% ja tämä taas laski vuosina 2015-2017 38 prosenttiin. Ulkoseinien liittymävuodot putosivat tuloksissa noin kymmenen prosenttia. Tuloksista on huomioitava se, että vuotokohtat ei ole suinkaan lisääntynyt viime vuosina, päinvastoin ne ovat vähentyneet. Nykyisin vuotokohtat ovat myös melko pieniä, mutta kuvaajasta voidaan tarkastella sitä, että mikäli nykyisin vuotokohtia havaitaan, niin mitkä ovat niitä tyypillisimpiä vuotopaikkoja.

Kuvaajasta huomataan, että ovet ja ikkunat sekä läpiviennit ovat yleisimpiä ilmanvuotokohtia. Tosin tuloksiin vaikuttaa paljon se, että merkkisavuilla ei ulkoseinän liittymäkohtien vuotokohtia voi yhtä hyvin tarkentaa kuin lämpökameralla. Lämpökameralla tarkasteltuja vuotokohtia ei taas ulkovaipan kohdalla voida tietää, onko kyse ilmavuodosta, vai lämmöneristeen epäjatkuvuuskohtasta. Tämä selvenee ainoastaan rakenneavauksella tai merkkiainetutkimuksella. Läpivienneistä sekä ovien ja ikkunoiden vuotokohtista on esitetty tarkentavaa materiaalia seuraavissa kuvaajissa (kuviot 33 ja 34).

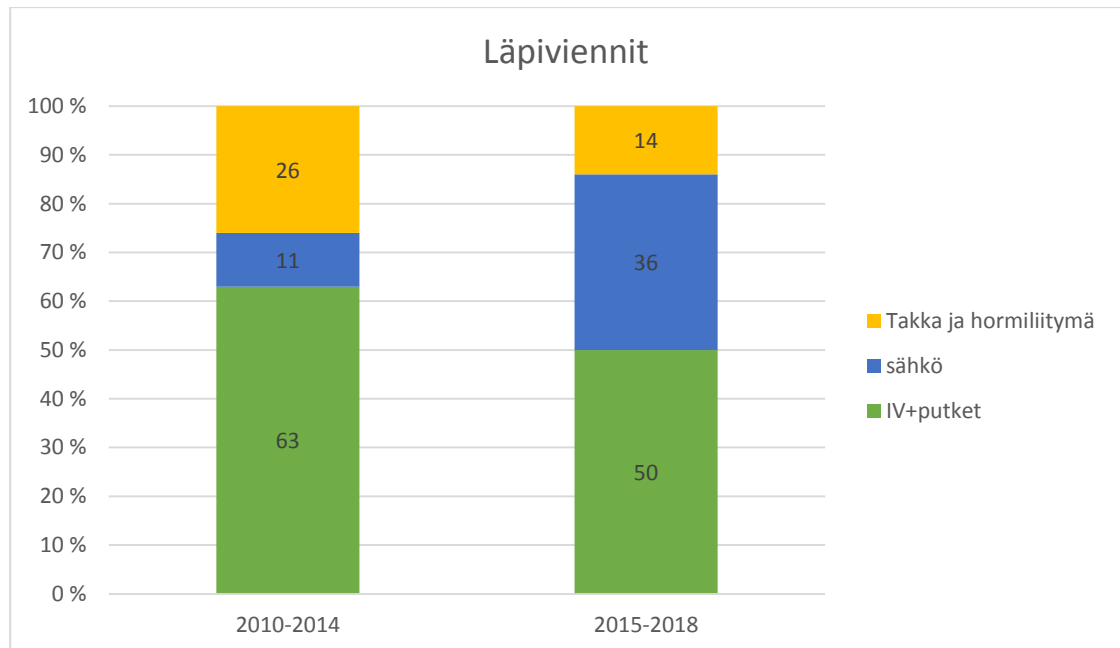


Kuvio 33. Ikkunoiden ja ovien vuotokohtatarkastelu

Ovien ja ikkunoiden liittymien tiivistyksessä on tullut huomattavaa edistystä. Ennen tiivisteiden ja liittymien suhdeluku on ollut puolet ja puolet, nyt taas liittymien vuotokohdat ovat pienentyneet n.35 prosenttiin ja ikkunoiden ja ovien vuodot ovat pääsääntöisesti tiivistevuotoja. Tiivistevuotoja tulee varmasti olemaan aina jonkin verran, mutta on hienoa huomata, että liittymien tiivistykseen on alettu panostamaan huomattavan paljon. Tässäkin on huomioitava, että itse vuotokohtia on nykyisin paljon vähemmän kuin ennen. Luotettavuuteen vaikuttaa se, miten ilmanvuotopaikat on merkitty raporttiin. Tiivistevuoto on saatettu merkitä raporttiin liittymävuotona, vaikka se sitä olisikaan todellisuudessa ollut.

Läpivientien osalta on myös tullut muutosta. Myöskin läpivientien osalta vuotokohdat ovat vähentyneet viime vuosina, mutta suurin osa vuotokohdista vuodesta 2015 tähän päivään löytyi sähkökeskuksien liittymissä ja sähköputkien läpivienneissä. IV-koneen liittymistä ja IV-hormien tiivistyksistä löytyi myös huomautettavaa. Tähän voi olla osasyynä se, että LVIS-työt eivät kuulu yleensä pääurakoitsijoille, vaan tehdään monesti aliurakkana. Urakkarajat saattavat usein olla häilyviä, ja läpivientien tiivistystyöt saattavat jäädä juuri urakkarajan väliin. On epäselvää, kummalle se kuuluu ja sopimuksissa ei näistä ole välttämättä edes mitään määritelmää. Myöskään loppu-tarkastuksissa ei päästä näkemään läpivientejä, koska ne ovat usein piilossa. Joten luotetaan siihen, että läpiviennit on tiivistyksiltään tehty kunnollisesti. Ainoastaan

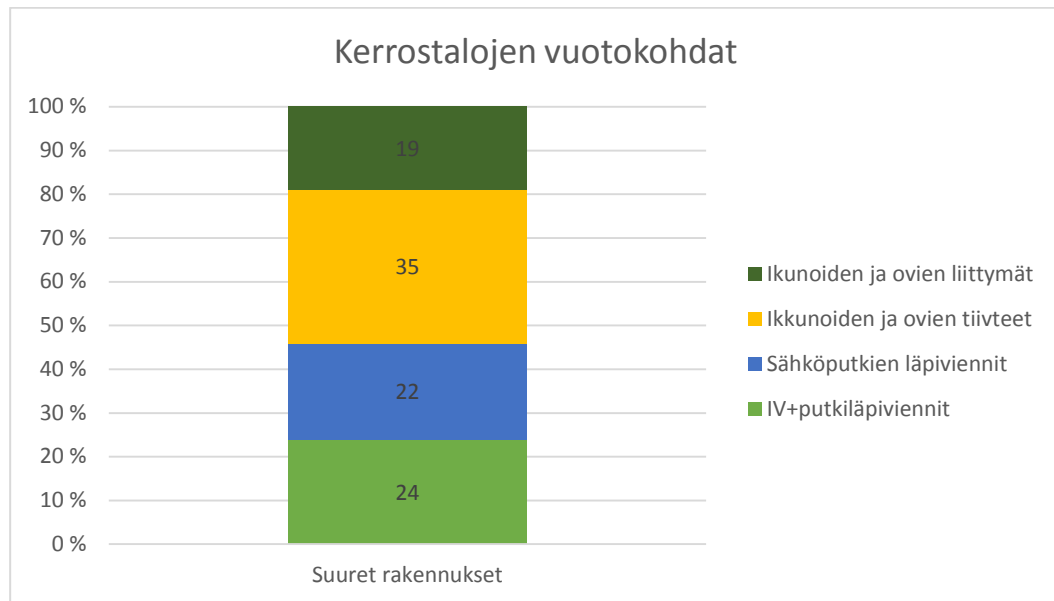
tiiviyksmittauksilla voidaan nähdä, kuinka tiivistykset on tehty ja silloinkaan ei aina päästä näkemään kaikkia läpivientejä. Usein, varsinkin nykyään tekniikkatilat ovat erillisillä sisäänkäynneillä, joten tiiviyksmittauksen aikana sinne ei päästä tutkimaan, miten tekniikkaläpiviennit on hoidettu. Joten lukema saattaa olla siis todellisuudessa vieläkin suurempi, kuin mitä tutkimustulokset näyttävät.



Kuvio 34. Läpivientien tarkastelut

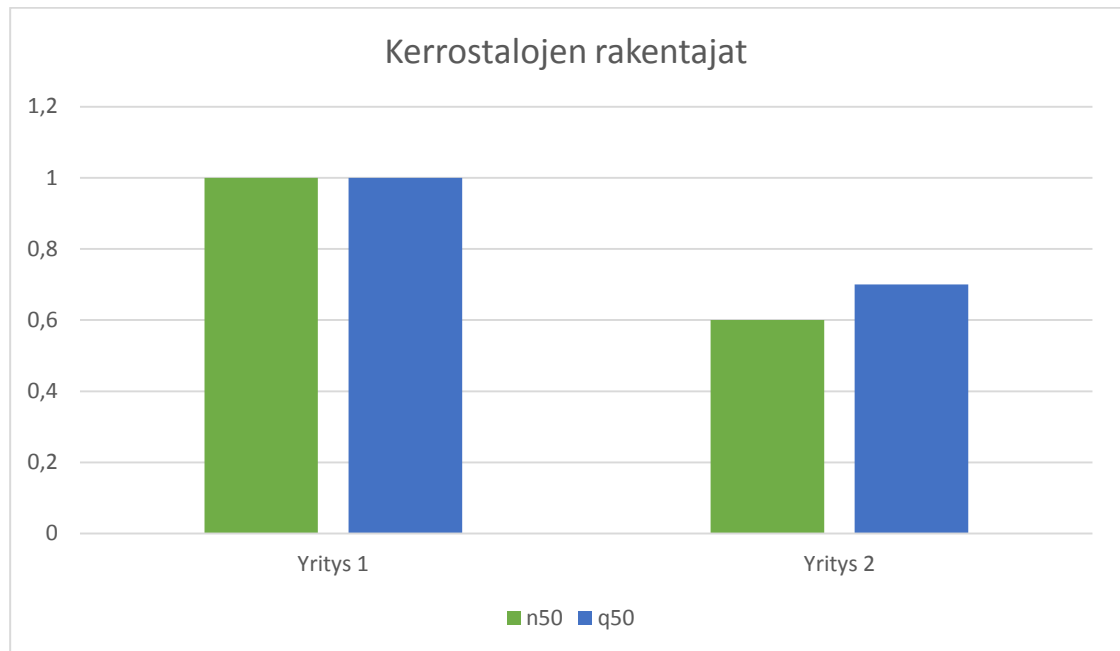
4.3 Kerrostalot

Kerrostalojen osalta vuotokohtat ovat jakautuneet melko tasaisesti (kuvio 35). Suurten rakennusten ulkovaipassa ei juuri tutkimuksessa olevien raporttien mukaan ollut vuotokohtia. Siksi niitä ei ole lainkaan kuvaajassa esitelty. Suurissa rakennuksissa yleensä käytetään betonielementtejä valmistuksessa ja betoni on itsessään hyvinkin ilmatiivis, joten sen vuoksi ei vaipoissa juuri esiinny vuotokohtia kerrostalorakenteissa. Samoin kuin pientalorakentamisessa, myös kerrostaloissa ikkunoiden ja ovien tiivisteet ovat suurimpia vuotokohtia. Sähkökaappien ja IV-koneiden liittymissä oli usein huomautettavaa. Nämä kaikki ovat melko pieniä vuotokohtia ja yhtään suurta vuotokohtaa ei kerrostaloissa ollut. Kerrostalojen ilmatiiviysluvutkin ovat melko hyviä, joten näillä ilmavuodoilla ei siis suurta vaikutusta ole. Ja voiko rakennusta ylipääntään tehdä täysin ilmatiiviiksi.



Kuvio 35. Kerrostalojen vuotokohdat

Samoin kuin pientalojen kohdalla, myös kerrostalorakentamisessa tutkimuksen tilaajalla on yhteistyökumppaneita. Kuvaajassa (kuvio 36) on vertailtu kahden yrityksen välillä ilmanvuotolukuja. Molemmilla yrityksillä oli vertailussa 7 rakennusta, joten tulokset ovat melko vertailukelpoisia. Molemmat yritykset ovat rakentaneet kerrostalonsa betonielementein ja muutkin runkorakenteet ovat olleet samanlaisia. Tässäkin nähdään, että yrityksellä on väliä ilmatiiviyyden osalta. Yrityksellä 1 ilmatiiviyslukujen keskiarvot olivat 1,0, kun taas yrityksellä 2 ilmatiiviyslukuarvot sijoittuvat 0,6 ja 0,8 välille.



Kuvio 36. Kerrostalojen yritysten vertailu

5 Yhteenveto tuloksista

Tutkimuksessa selvitettiin eri rakennetyyppien eroja ilmatiivyyden osalta. Pientaloja tarkasteltiin tarkemmin ja niitä tutkittiin ilmatiivyyden osalta eri asioita vertaillen. Selvitettiin myös, ovatko vuotokohdat muuttuneet vuosien varrella. Mitä kehitystä ilmatiivyyden osalta on tapahtunut, miten eri runkomateriaalit poikkeavat toisistaan ilmatiivyyden osalta ja onko rakennusten kerrosluvulla mitään merkitystä. Tutkimuksessa vertailtiin myös eri yritysten rakentamia rakennuksia.

Kerrostalojen ja rivitalojen osalta otanta oli sen verran pieni, ettei niistä voinut tehdä yksityiskohtaisempia tarkasteluja. Tutkittavien raporttien mukaan näitä on mitattu huoneistokohtaisesti sekä talokohtaisesti, mutta näiden eroja ei selvitetty mittausraporttien vähyyden vuoksi. Kerrostaloissa suurta muutosta ei vuosittain ollut havaittavissa, johtuen ehkä siitä, että otanta oli suoritettu 2010 eteenpäin jolloin on jo kiinnitetty huomiota ilmatiivyyteen. Lähtökohtaisesti kerrostalojen ilmatiivyydet olivat hyviä, keskiarvoltaan $0,7 \text{ [m}^3/(\text{h m}^2)$, mikä on todella hyvä arvo. Kerrostalojen osalta tarkasteltiin myös vuotokohtia. Vuotokohdista kerättiin keskiarvo prosentteina kaikista tutkimuksessa olleista kerrostaloista. Vuotokohdat kerrostaloissa olivat usein melko vähäisiä ja kuten aiemmatkin tutkimukset kertovat, yleisimpiä vuotokohtia kerrostaloissa ovat läpiviennit ja ikkunat ja ovet. Yritysverailussa oli kaksi eri yritystä

ja näiden osalta huomattiin, että jonkun verran eroa on eri yrityksen rakentamien talojen laadulla ilmatiivyyden osalta. Tosin mitään dramaattista eroa ei näissä ollut. Kaiken kaikkiaan kerrostalojen ilmatiiveysluvut olivat hyviä, eikä mitään suuria eroja ollut havaittavassa aiempiin tutkimuksiin ilmatiiviydessä.

Rivitaloissa oli erikoista huomata se, miten huonoja tiiveyslukemat olivat. Ilmatiivyyd- luvun q50 kokonaiskeskiarvo oli $1,2 \text{ [m}^3/(\text{h m}^2)$. Miksi näin, siihen ei ole yksiselitteistä vastausta. Verrattuna aiemmin tehtyihin tutkimuksiin, tässä tutkimuksessa ilman- vuotoluku rivitalojen osalta oli huonompi. Rivitaloja oli tässä tutkimuksessa ainoas- taan 10 kappaletta, joten tutkimustulos ei ollut tältä osin kovin luotettava. Kuitenkin oli huomattavaa se vuosittaista vertailua tarkasteltaessa, että myös rivitalojen osalta kehitystä on tapahtunut.

Pientaloissa tutkittiin perusteellisemmin runkorakenteiden, kerrosluvun ja vuosiluku- jen mukaan. Mielenkiintoisinta oli se, miten elementtirakenteiset ja pitkistä tavaras- ta tehdyt rakennukset erosivat niin suuresti. Nykyrakentamisessa käytetään paljon myös pientalojen osalta elementtirakenteisia taloja, ja tämä on ainakin ilmatiivyyden osalta kannattavaa.

Harkkorakenteisissa ja puurakenteisissa rakennuksissa oli huomattava ero. Usein tutkimuksissa on selvitetty kivirakenteisien ja puurakenteisien talojen eroja, mutta kevytsoraharkkorakenteisia ei ole juurikaan vertailtu. Kivi- ja betonirakenteiset talot ovat lähtökohtaisesti hyvin tiiviitä, mutta kun siirrytään harkkorakenteisiin ja nimen- omaan kevytsoraharkkoihin, ei tiiviys olekaan enää samaa luokkaa. Kuten aiemmin on jo todettu, harkkorakenteisia pientaloja ei rakenneta läheskään niin paljon kuin puurakenteisia, eli ehkä tässä ollaan vasta opetteluvaiheessa. Liitoskohdat harkkora- kenteisissa seinissä vaativat huolellista suunnittelua. Eli olisiko osaamisen puute syy- nä tähän?

Kerroslukujen vertailu oli mielenkiintoista. 2-kerroksiset talot ovat yleisesti tunnettu- ja siitä, että niillä on heikompi ilmanvuotoluku kuin 1-kerroksisilla. Tutkimuksen tu- loksissa tämä kääntyi taas päinvastoin puurakenteilla taloilla. Tämä saattaa johtua siitä, että otanta oli tutkimuksessa melko pieni ja 1-kerroksisia oli tuloksissa enem- män kuin 2-kerroksisia. Kuten aiemmin tutkimuksessa on todettu, ehkä myös raken- nuksen koko vaikuttaa tähän. Yksittäiset vuotokohdat eivät välttämättä vaikuta tu-

loksiin suuremmissa rakennuksissa niin paljon kuin kooltaan pienemmissä rakennuksissa.

Pientaloissa yritysvertailu osoittautui hyödylliseksi. Kahden yrityksen välillä oli huomattavan suuri ero ilmatiiviyksiluvuissa, vaikka molemmat yritykset rakentavat samantyyppisistä elementeistä talonsa. Tässä ei vertailtu, oliko 1- tai 2 kerroksisia taloja suhteessa toisella enemmän tai vähemmän, myöskään vuosilukuja ei otettu huomioon. Nämä vaikuttavat tuloksiin varmasti jollain tasolla.

Vuotokohtien tarkastelussa pientaloissa kehitystä oli tapahtunut erityisesti ikkuna ja oviliittymien tiivistyksissä. Ikkunat ja ovet edelleenkin vuotavat tiivisteistään, mutta ne eivät varmasti ikinä tule olemaankaan täysin ilmatiiviitä. Lämpivienneistä oli vaikea sanoa, miten paljon läpivientien osalta oikeasti vuotaa. Tekniikkatilat ovat usein järjestettynä omalla sisäänkäynnillään, joten niitä läpivientejä ei päästä tutkimaan ilmatiivieysmittauksen yhteydessä. Joka tapauksessa IV-koneen ja sähköläpiviennit ovat nykyään yleisimpiä vuotokohtia ja niihin tulisi kiinnittää erityistä huomiota rakennettaessa. Kaiken kaikkiaan vuotokohdat ovat pysyneet melko samoina ja nykyään vuotokohtia on havaittavissa paljon vähemmän kuin ennen.

Kaikki vuotoilma kuluttaa aina energiaa ja seuraavassa onkin esitettyä esimerkkilaskelma vuotoilman vaikutuksesta energiankulutukseen ja hintaan. Aikaisemmin on esiteltyä ilmanvuotolaskennan kaavat, joilla laskelma on laskettu (kaavat 1 ja 2). Laskelmassa on vertailtu kahdella eri ilmanpitävyyden arvolla, kuinka paljon energiaa kuluu ja paljonko se kustantaa vuodessa.

Ilmanpitävyys q50	1,66 q50	Ilmanpitävyys q50	1,3 q50
Vaipan ala m ²	267 m ²	Vaipan ala m ²	267 m ²
k-kerroin	35	k-kerroin	35
Vuotoilma	0,003517619 m ³ /s	Vuotoilma	0,002755 m ³ /s
Ominaislämpöhäviö	4,221142857 W/K	Ominaislämpöhäviö	3,305714 W/K
Lämmöntarveluku kd	4469 K	Lämmöntarveluku kd	4469 K
Vuotoilman energia	453 kWh/v	Vuotoilman energia	355 kWh/v
Energian hinta	0,14 €/kWh	Energian hinta	0,14 €/kWh
Kulutus	63 €/v	Kulutus	50 €/v

Kuvio 37. Vuotuinen vuotoilman energiantarve (Kankaanpää 2015, 27).

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

On muistettava, että rakennuksen ilmanvuotoluku ei yksistään vaikuta rakennuksen energiankulutukseen. Rakennuksen vaipan, taloteknisten järjestelmien, sääolosuhteiden ja käytön yhteisvaikutus määrää lopulta rakennuksen toimivuuden. Edellä esitetty laskelma antaa kuitenkin suuntaa sille, mikä vaikutus on pelkästään vuotoil-malla energiankulutukseen.

6 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon ilmatiiviyys on kehittynyt vuosien varrella. Eri talotyyppejä vertailtiin keskenään ja etenkin omakotitaloista tutkittiin ja vertailtiin asioita eri näkökulmista.

Tuloksista voidaan päätellä, että etenkin pientalojen osalta kehitystä on tapahtunut. Lisääntyvä elementtirakentaminen on ollut hyväksi ja varsinkin puutalot ovat hyvin ilmatiiviitä rakenteiltaan ja vastaavat hyvin tämän päivän vaatimuksiin.

Tästä maasta löytyy monen laatuista yrityksiä ja rakentajia ja kuten tutkimuksessakin huomattiin, rakentajalla on väliä. Laatua ei saa halvalla, se on totuus ja etenkin rakentamisessa kannattaa maksaa hieman enemmän hyvästä laadusta. Muutamana tuhannen säästö rakentamisen aikana ei lohduta siinä vaiheessa, jos rakenne on viallisesti toteutettu ja esimerkiksi kosteusvaurio syntynyt puutteellisen laadun vuoksi.

Energiatehokkaista taloista on monia mielipiteitä, varmasti yhtä monta kuin on rakentajaakin. Etenkin energiatehokkuuteen vahvasti liittyvä ilmatiiviyys puhuttaa ja siitä saa aina keskustelua aikaan. Tästä löytyy puolesta ja vastaan puhujia, myös rakennuspiirien sisäpuolella. Absoluuttista totuutta tuskin kukaan osaa sanoa sille, onko tämä tiivis rakentaminen pitkällä aikavälillä edullista rakenteelle vai ei.

Muovin käyttö rakentamisessa on herättänyt keskustelua jo 1980-luvulta asti. Asia on varsin kiistanalainen edelleen. Muovin katsotaan aiheuttavan kosteusongelmia rakenteisiin. Tosiasiassa kosteus- ja homeongelmien syntyminen on monen tekijän summa. Rakennusvirheitä tehdään niin suunnittelussa kuin toteutuksessakin. Suurin osa virheistä on sellaisia,

joihin ei edes tarkastaja puutu. Rakennusfysiikan tuntemus on pelottavan alhainen, jopa rakennusalan ammattilaisilla. Siksi ei usein tiedosteta sitä, mihin esimerkiksi puutteellisesti tiivistetyt höyrynsulut vaikuttavat. Näistä niitä ongelmia syntyy. Mikäli höyrynsulussa on epätiivelyskohtia, voi kosteus sitä kautta päästä sisäilmasta rakenteisiin ja tiivistyä siellä vedeksi. Tämä voi pahimmillaan johtaa rakenteiden vaurioitumiseen niin merkittävästi, että rakenne joudutaan uusimaan. Tiiviisti rakennetussa talossa riski kosteus- ja homevaurioiden syntymiseen pienenee oleellisesti.

Hirsitalojen suosio on kasvanut viime vuosina räjähdysmäisesti ja näitä pidetään nimenomaan hyvän sisäilmaston takia hyvin suuressa arvossa. Massiivihirsitaloissa ei muovia tarvitse käyttää ja sillä usein perusteellaankin hirsitalojen erinomaisuutta. Tosin täytyy muistaa, ettei hirsitalokaan ole homehtumaton eikä ratkaise sisäilmaongelmia jos rakennusvaiheessa tehdään virheitä. Millä materiaalilla tahansa huonosti suunniteltuna ja toteutettuna voi tehdä sisäilmaongelmaisen talon. Sillä ei ole merkitystä, onko se betonia, puuta vai hirttä.

On mielenkiintoista nähdä, miten muovin käy. Onko 50 vuoden päästä pelkkiä massiivihirsitaloja, vai onko muovi edelleen käytössä? Keksitäänkö kenties joku uusi materiaali ilmanpitävyyden toteuttamiseen?

Lähteet

782/2017 Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Suomen säädöskokoelma. 24.12.2017. Viitattu 1.4.2018.

1009/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Suomen säädöskokoelma. 27.12.2017. Viitattu 1.4.2018.

1010/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. 27.12.2017. Viitattu 1.4.2018.

Energiatehokkuus. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. 20.12.2017. Rakennuksen energiankulutukseen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Viitattu 1.4.2018.

Fluke TiS45-lämpökamera. 2018. Kuva lämpökamerasta Fluken www-sivuilla. Viitattu 1.4.2018. <http://www.fluke.com/fluke/fifi/lampokamerat/Fluke-TiS45.htm?PID=79862>

Ilmatiiveyden varmistaminen. 2018. Artikkel Isoverin www-sivuilla. Viitattu 1.4.2018. <https://www.isover.fi/suunnittelijalle/ilmatiivis-rakentaminen/ilmatiiviuden-varmistaminen>

Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa. 2017. Raportti Vertian www-sivuilla. 22.8.2017. Viitattu 1.4.2018. <https://vertia.fi/ilmatiiveys-ja-vuotokohdat-uusissa-rakennuksissa-22017/>.

Ilmavirtaukset rakennuksessa. 2008. Artikkel Sisäilmayhdistyksen www-sivuilla. Viitattu 5.4.2018. <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa> .

Kankaanpää, T. 2015. Rakennuksen ilmatiiviiden ja energiatehokkuuden parantaminen. Opinnäytetyö, AMK. Metropolia ammattikorkeakoulu, talotekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 2.4.2018. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/86998/Inssityo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Kosteus rakentamisessa, Ympäristöopas C2. 1999. Tampere: Ympäristöministeriö.

LVI 02-40078. 2010. Energiatehokkuus rakentamisessa. Rakennustietosäätiö. Viitattu 17.2.2018. <https://janet.finna.fi/> , Rakennustiedon verkkopalvelu.

Oikarinen, A. 2013. Omakotitalon ilmatiivysmittaus ja lämpökuvaus. Opinnäytetyö, AMK. Kajaanin ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, rakennustekniikan koulutusohjelma. Viitattu 2.4.2018. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201303193444> .

Paloniitty, S. 2004. Rakennuksen lämpökuvaus. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu.

Paloniitty, S. 2013. Rakennusten tiivysmittaus. 2. p. Helsinki: Suomen Rakennusmedia.

Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Ympäristöministeriö. 19.12.2017. Viitattu 1.4.2018.

Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Ympäristöministeriö. 19.12.2017. Viitattu 1.4.2018.

Perustelumuistio ympäristöministeriön asetukseen rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Ympäristöministeriö. 24.11.2017. Viitattu 1.4.2018.

Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. 2016. Toim. M. Pitkäranta. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Rakennuksen ilmatiiveys. 2014. Artikkelit RakLamitin www-sivuilla. viitattu 1.4.2018. <https://raklamit.fi/ilmatiiveysmittaus/>.

RIL 255-1-2014. 2014. Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Tammerprint Oy. Viitattu 1.4.2018.

RT 14-11239. Rakennuksen lämpökuvaus. Rakennustietosäätiö. Viitattu 2.2.2018. <https://janet.finna.fi/> , Rakennustiedon verkkopalvelu.

RT 14- 11197. Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein. Rakennustietosäätiö. Viitattu 17.2.2018. <https://janet.finna.fi/> , Rakennustiedon verkkopalvelu.

RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustietosäätiö. Viitattu 2.2.2018. <https://janet.finna.fi/> , Rakennustiedon verkkopalvelu.

Romppainen, I. 2010. Lämmin puutalo: ohjeet ilmanpitävään ja energiaa säästävään rakentamiseen. Helsinki: Rakennustieto.

SFS-EN ISO 9972:2015, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto.

Tasauslaskentaopas. 2018. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen. Ympäristöministeriö. 31.3.2017. Viitattu 1.4.2018.

Tiiviillä rakenteella kustannukset kuriin. 2012. Artikkelit Rakentajan www-sivuilla 16.7.2012. Viitattu 26.2.2018.

https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9066/tiiviilla_rakenteella_kustannukset.htm.

Toimivat Katot 2013. 2013. Kattoliitto. Viitattu 1.4.2018.

http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat_Katot_2013_reduced_size_.pdf.

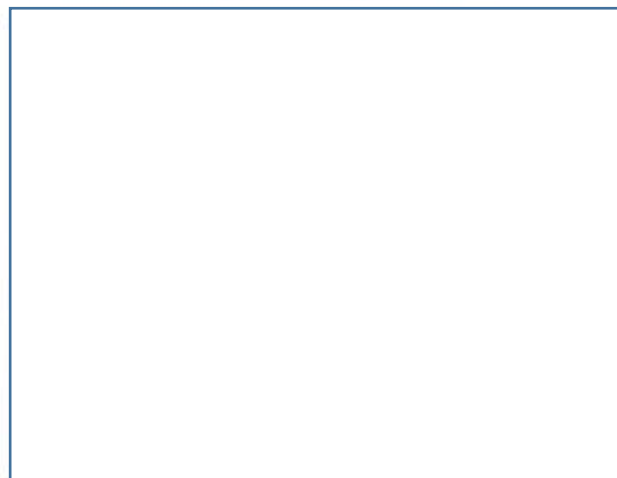
Liitteet

Liite 1. Tiiviysmittausraportti (Inmeco Oy arkisto)

1

INMECO Oy
 RAKENNUSKONSULTIT
 Ilmativeystekijä: Mia Maula

TIIVIYSMITTAUSRAPORTTI, RAKENNUSAIKAINEN OMAKOTITALO



TIIVIYSMITTAUSLUOKITUS		n50	q50
Alle 0,6	A		
0,7-1,0	B	0,7	0,7
1,1-1,5	C		
1,6-2,0	D		
2,1-3,0	E		
3,1-4,0	F		
Yli 4,1	G		

Tutkija	
<i>Mia Maula, RI amk opiskelija</i>	

SISÄLTÖ

KOHTEEN YLEISTIEDOT	3
Kohde ja osoite	3
Tutkimuksen tilaaja	3
Tutkimuksen tavoite	3
Tutkimuksen tekijät	3
Tutkimusajankohta	3
Kuvaus kohteesta	3
Mittauksen rajaus	4
Mittauskäytäntö	4
Virhearviointi	4
LÄHTÖARVOT	4
Mittausmenetelmät	4
Ulko- ja sisäilman olosuhteet	5
Mittalaitteiden sijainti	5
Rakennuksen ilmanvaihto	5
Rakennuksen rakenteet	5
JOHDANTO TIIVIYSMITTAUKSEEN	6
Ilmanpitävyyden vaatimukset ja suositukset uusissa rakennuksissa	6
Ilmativeis vaippa	7
Ilmanpitävyyden mittaaminen	8
Mittalaitteiden kalibrointitiedot	8
Käsitteitä	8
VAIPAN ILMAVUOTOLUKU	8
LIITTEET	9
KUVAT TIIVISTYKSISTÄ	10
HAVAITUT VAIPAN VUOTOKOHDAT	11

Ilmativeystekijä: Mia Maula

KOHTEEN YLEISTIEDOT

Kohde ja osoite

Omakotitalo

Tutkimuksen tilaaja

Hannu Hanhi

Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli tehdä asuintalon ulkovaipan ilmapuotoluvun mittaus rakennusvalvonnan käyttöönottoa varten ja varmistaa lupavaiheen energiatodistuksen lukuarvoja. Haluttiin selvittää myös mahdolliset vaipan ilmapuotokohdat, jotka etsittiin merkkisavun avulla.

Tutkimuksen tekijät

Tutkimuksen suoritti INMECO Oy Rakennuskonsultit Mia Maula.

Tutkimusajankohta

Mittaus suoritettiin maanantaina 1.1.2017 klo 8:00-13:00 välisenä aikana.

Kuvaus kohteesta

Mittattava kohde on yhden perheen omakotitalo ja se sijaitsee Jyväskylässä. Kohde on 1-kerroksinen uudisasuinrakennus. Asunnossa on eteinen, neljä makuuhuonetta, keittiö, olohuone, vaatehuone, pesuhuone, sauna, wc ja tekninen tila. Tontilla on myös erillinen varistorakennus, joka ei kuulunut mittauspiiriin.

Kerrosala yhteensä on 186,5m², huoneistoala 156,0m² ja tilavuus 700,0m³. Rakennuksen ulkoseinät ja yläpohja ovat puurunkoiset. Höyrinsulkuna vaipassa on käytetty höyrinsulkumuovia limitetyin ja teipatuin saumoin.

Rakennus on perustettu betonianturoin ja alapohja on maanvarainen teräsbetonilaatta. Laatan alapuolisena eristeenä on käytetty EPS-eristettä 200mm.

Rakennuksen lämmönlähteenä on maalämpö ja lämmönjakajana vesikiertoinen lattialämmitys. Ilmanvaihto on koneellinen tulo-poisto järjestelmä lto:lla varustettuna.

Mittaushetkellä rakennus oli vielä kesken, valmiusaste oli noin 80%. Rakennuksen tiiveyteen liittyvät työvaiheet oli tehty. LVIS-kalustukset sekä loppusiivous oli vielä tekemättä.

Käyttöönottokatselmus pidetään helmikuussa.

Ilmativeystekijä: Mia Maula

Mittauksen rajaus

Mittavan kohde oli itse asuinrakennus, joka kuului ilmanvaihtokoneen piiriin. Laajuustiedot mitattiin ja laskettiin rakennekuvista.

Laajuustiedot ovat seuraavat :

lattiapinta-ala (m²)	171,8
ilmatilavuus (m³)	511,4
ulkovaipan pinta-ala (m²)	534,5

Mittauskäytäntö

Mitattavan tilan läpikäyminen paikan päällä.

Seuraavat läpiviennit tukittiin:

- Iv-kone pois päältä, kaikki talon poisto- ja tulokanavat tulpattu tiivistepalloilla tai tehdasvalmisteisilla kansilla
- Lattiakaivot teipattu
- Vesiputket teipattu tai päissä tulppaukset
- Liesituulettimen poistokanava teipattu
- Vesikatolla tulpattiin liesituulettimen poisto ja IV-kanavat
- Huippumurin poistokanavan putki teipattu
- Ikkunat ja ulko-ovet suljettuina

Virhearviointi

Huomioitavaa seuraavat asioiden tuloksen analysoidessa:

- Tilavuusvirta vaihdettava +20 °C (T1/T2=V1/V2) kaupallinen laite ottaa huomioon automaattisesti lämpötila-arvon muutoksen
- Rakennustilavuusvirhe noin 2%
- Paine-erovirhe noin 5%

Eli tulos arvioidaan +/- 0,1 l/h

LÄHTÖARVOT

Mittausmenetelmät

Käytetyt mittauskalusto:

Tiiveysmittauslaite:

Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door , S/N 10 (Maahantuojat:Teknocalor) CE4454

Paine-eromittari: The Energy Conservatory: DG-700 Pressure&Flow Gauge (61733-107-700E2)

Ulkolämpötila ja tuulen nopeusmittari: SwemaAir 40 Art.763000 Ser.No 363489

Sisälämpötila: Trotek TS200 SDI ZB911 2011 – 022.0707.0306.1.1.15

Ilmatieystekijä: Mia Maula

Ulko- ja sisäilman olosuhteet

Ulkoilman olosuhteet:

Ulkolämpötila °C	-4,5
Tuuli m/s	0-1
Tuulen suunta	luode (sää tiedot)
Ilmanpaine (hPa)	~1010,3 (sää tiedot)

Sisäilman olosuhteet:

Lämpötila °C	+16,5
Paine-ero Pa alkumittaus	saunan ikkuna +0,5Pa ulko-ovi 1,5 Pa

Mittalaitteiden sijainti

Painekoelaitteisto asennettiin olohuoneen terassin oveen.

Ulkoilman lämpötila ja tuulen suuruus mitattiin rakennuksen välittömästä läheisyydestä rakennuksen pääoven sisääntulon puolelta rakennuksen piha-alueelta. Sisätilan lämpötila mitattiin olohuoneesta noin 1.1 metrin korkeudelta.

Rakennuksen ilmanvaihto

Rakennuksessa on koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä LTO:lla varustettuna. Liesituuletin on omalla poistolla, poisto vesikatolla.

Rakennuksen rakenteet

Alapohja -maanvarainen

Pintamateriaali ja -käsittely
 Teräsbetoni laatta 80mm
 Lattiaeriste EPS 100L 200mm
 Salaojakerros väh.300mm
 Perusmaa

Ulkoseinä

Pintakäsittely / -pinnoitus, kipsilevytys 13mm
 Vaakakoolaus 48x48 k600 + kivivilla 50mm
 Höyrynsulkumuovi
 Runko 44x197 k600 + kivivilla 200mm
 TS-levy 9mm
 Pystyrima 25x50 k600
 Ulkoverhouspanelointi vaakaan 23mm

Yläpohja

Pintakäsittely / -pinnoitus
 Kattopaneeli tai kipsilevy 14mm
 Harvalauta 48x48 k300
 Höyrynsulkumuovi
 NR-ristikot k900 + selluvilla 500mm
 Aluskate
 Tuuletusrimat 50x25 k900

Osoite
 Vehkakuje 2 B
 40700 JYVÄSKYLÄ

Puhelin/fax
 010 229 0370

Sähköposti
etunimi.sukunimi@inmeco.fi
 Ly 1637178-9
 Kr 801.787

Ilmativeystekijä: Mia Maula

Ruoteet 25x100 k300
Classic-peltikate

JOHDANTO TIIVIYSMITTAUKSEEN

Ilmanpitävyyden vaatimukset ja suositukset uusissa rakennuksissa

Rakennusmääräyskokoelman Tasauslaskentaoppaassa 2018, kohdassa 3.4.3. sanotaan: 3.4.3. Sekä rakennusvaipan että tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, että vuotokohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille, rakenteille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulku.

Rakennusvaipan pieni ilmanvuotoluku ei kuitenkaan takaa vaipparakenteiden moitteetonta toimintaa ilmatiivyyden osalta, koska vaipassa voi silti esiintyä paikallisesti merkittäviä ilmanvuotokohtia. Siksi ilmansulun kaikkien liitosten ja reikien huolellinen tiivistäminen on tärkeää.

Ympäristöministeriön asetuksessa 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto, pykälässä 21 sanotaan:

21 § Ilmavirroista aiheutuvat paineet ja rakenteiden ilmanpitävyys
Erityissuunnittelijan on suunniteltava rakennuksen ulko- ja ulospuhallusilmavirrat siten, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaineen vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan on tehtäviensä mukaisesti suunniteltava rakennuksen vaipan ja sisä rakenteiden ilmanpitävyys ja hormivaikutuksen hallinta siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa ja vältetään rakenteissa olevien epäpuhtauksien, maaperässä olevien epäpuhtauksien ja radonin siirtymistä sisäilmaan ja vältetään kosteuden siirtymistä rakenteisiin.

Rakentamismääräyskokoelman energiatehokkuuden ohjeissa: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2018, taulukossa 3.5. on esitetty tyyppillisiä vaipan ilmavuotolukuja (Kuvio 1).

Ilmativeystekijä: Mia Maula

Kuvio 1. Rakentamismääräyskokoelmassa esitettyjä tyypillisiä rakennusten ilmapuotolukuja erilaisille rakennuksille

Tavoite-ilmanpitävyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset n_{50} -luvut, 1/h	Tyypilliset q_{50} -luvut, $m^3/(h \cdot m^2)$
Hyvä ilmanpitävyys	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa ja valvonnassa ja toteutuksessa (erillistarkastus)	Pientalo 1,0 – 3,0	Pientalot 1,0 – 3,0
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 0,5 – 1,5	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,0 – 4,0
Keskimääräinen ilmanpitävyys	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti sekä suunnittelussa ja valvonnassa	Pientalo 3,0 – 5,0	Pientalot 3,0 – 5,0
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,5 – 3,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 4,0 – 8,0
Heikko ilmanpitävyys	Ilmanpitävyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 5,0 – 10,0	Pientalot 5,0 – 10
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 3,0 – 7,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 8,0 – 20,0

Rakentamismääräyskokoelmassa annetaan siten ohjeita millä tasolla tiiviiden tulisi olla, ja todetaan että vuotoilmavirtoja ja ilmanpitävyyttä voidaan arvioida mittaustulosten perusteella.

Ilmatiivis vaippa

Hyvän ilmativeyden saavuttaminen rakennuksen vaipparakenteissa on tärkeä monestakin syystä. Ehkä tärkeimpänä yksittäisenä tekijänä voidaan pitää rakennuksen vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistamista. Siirryttäessä entistä paremmin eristäviin vaipparakenteisiin tulee hallitsevamman vuotoilman kulkeutuminen rakenteen sisään estää, jotta vältytään rakenteiden kosteus ja homevaurioriskeiltä. Nykyisten asumistottumusten seurauksena sisäilman kosteus voi olla talviaikana jopa 4-5 g/m³ sisäilmassa, jolloin kosteuskonvektion riski kasvaa. Jos vaipparakenteissa on ilmapuotoreittejä, voi sisäilman kosteus kulkeutua ilmapuotosten mukana kylmiin rakenteiden osiin ja aiheuttaa kosteusvaurioriskin.

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

Ilmativestekijä: Mia Maula

Kolmas merkittävä tekijä hyvään ilmativiyteen pyrkimisessä on energiakulutuksen pienentäminen. Hallitsemattomalla vuotoilmalla on suuri vaikutus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Esimerkiksi pientaloissa laskennallinen kokonaisenergiankulutuksen lisäys on keskimäärin 4% jokaista n50-luvun kokonaisuksiön lisäystä kohti. Vuotoilman tarvitseman energian osuus suhteessa kasvaa siirryttäessä matalaenergiarakentamiseen suuntaa.

Ilmanpitävyyden mittaaminen

Rakennuksen tai sen osien tiiviyttä mitataan Suomessa ns. alipainemenetelmällä, jossa tutkittavaan tilaan aiheutetaan 50 Pa:n alipaine ulkoilmaan nähden. Alipaine saadaan aikaan puhaltimella. Puhallin asennetaan ulko-oveen tai ikkunan tuuletusluukun paikalle. Vuotokäyrä ajetaan 5-10 Pa:n välein 0-55 Pa välillä.

Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan. Kun ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan vaipan alalla, saadaan ilmanvuotoluku q50. Ilmanvuotoluku q50 esitetään yksikössä $m^3/(hm^2)$.

Mikäli halutaan selvittää myös ilmanvuotoluku n50, niin ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella. Ilmanvuotoluku esitetään yksikössä 1/h, vaihtoa tunnissa.

Vuoden 2012 heinäkuussa ilmanvuotoluvun laskentaperusteet muuttuivat siten, että ennen käytössä ollut n50-luku on korvattu q50-luvulla. Tähän on olennaisesti vaikuttanut se, että etenkin suuret rakennukset saivat geometriansa takia parempia arvoja n50-luvulla, kuin pienet rakennukset. Tästä johtuen q50-luku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä. Ilmanpitävyyden mittaustuloksena on suositeltavaa ilmoittaa sekä q50, että n50-luku, vaikka energiaselvitykseen käytetäänkin vain q50-lukua.

Mittalaitteiden kalibrointitiedot

Painekokeessa käytettävät mittauslaitteet tulee kalibroida säännöllisesti.

Ohjeelliset laitteiston kalibrointivälit ovat seuraavat:

- painekoelaitteisto neljän vuoden välein (kalibroitu 2.11.2015)
- virtaus- ja paine-eromittarit kahden vuoden välein (kalibroitu 4.10.2016)
- lämpötila-anturit neljän vuoden välein (kalibroitu 23.9.2014)

Käsitteitä

Tiiviysmittaus:

Rakennuksen ulkovaipan ilmanvuotoluvun q50 määrittäminen 50 Pa alipaineessa (tai ilmanvuotokohtien etsiminen muussa, käyttötilannetta suuremmassa alipaineessa).

Normaali käyttötilanne

Normaalilla käyttötilanteella tarkoitetaan olosuhteita, joissa mitattava tila tavallisesti sitä käytettäessä on.

VAIPAN ILMAVUOTOLUKU

Ilmativeystekijä: Mia Maula

Asuinrakennuksessa mitattiin vaipan ilmavuotoluku standardin SFS-EN ISO 9972 (kumonnut 5.10.2015 aiemmin käytössä olleen standardin SFS-EN 13829) mukaan menetelmällä B, jossa ilmanvaihtokanavat ja vesilukot tukittiin ennen koetta.

Rakennuksen ilmavuotolukuna voidaan pitää mittausten ilmavuotolukujen keskiarvoa eli

Ilmavuotoluku $n_{50} = V/V$ (ilmantilavuusvirta (m³/h) / rakennuksen sisätilavuus (m³))

Mittaus 1 alipaine	0,72	0,78
Mittaus 2 ylipaine	0,84	

$$n_{50}: (0,72+0,84)/2=1,56/2= 0,78 \pm 0,1 (1/h)$$

Rakennusvaipan ilmavuotoluku $q_{50} = (m^3/(hm^2))$
 (ilmantilavuusvirta (m³/h) / rakennuksen vaipan pinta-ala (m²))

Mittaus 1 alipaine	0,69	0,75
Mittaus 2 ylipaine	0,80	

$$q_{50}: (0,69+0,80)/2=1,49/2 =0,75 \pm 0,1 (m^3/(h m^2))$$

RAKENNUKSESSA ON HYVÄ ILMANPITÄVYYS. SAUMOJEN JA LIITOSTEN ILMANPITÄVYYTEEN ON KIINNITETTY ERITYISTÄ HUOMIOTA SEKÄ SUUNNITTELUSSA ETTÄ RAKENNUSTYÖN TOTEUTUKSESSA JA VALVONNASSA.

Jyväskylässä 1.1.2017

Mia Maula, RI amk opiskelija

LIITTEET

KUVAT TIIMISTYKSISTÄ
 VAIPAN VUOTOKOHDAT
 POHJAKUVAT, JOSSA PAINE-EROT JA VAIPAN VUOTOKOHDAT MERKITY
 MITTAUSRAPORTTI
 KENTTÄTYÖRAPORTTI
 KALIBROINTITODISTUKSET

KUVAT TIIVISTYKSISTÄ



Koneisto asennettuna olohuoneen oveen



Takan piippu tulpattu vesikatolta



Katolla tulpattu kanavat



Teknisentilan lavuaari teipattu



IV-koneen tulppaus



IV-koneen tulppaus

Ilmativeystekijä: Mia Maula

HAVAITUT VAIPAN VUOTOKOHDAT



Olohuoneen pistorasiat vuotavat



Keittiön putkien läpiviennissä vuotoa

Olohuoneen ikkunan yläreunassa vuotoa



Saunan ja pesuhuoneen välisen seinän nurkka vuotaa runsaasti koko pituudeltaan.

Osoite
Vehkakuja 2 B
40700 JYVÄSKYLÄ

Puhelin/fax
010 229 0370

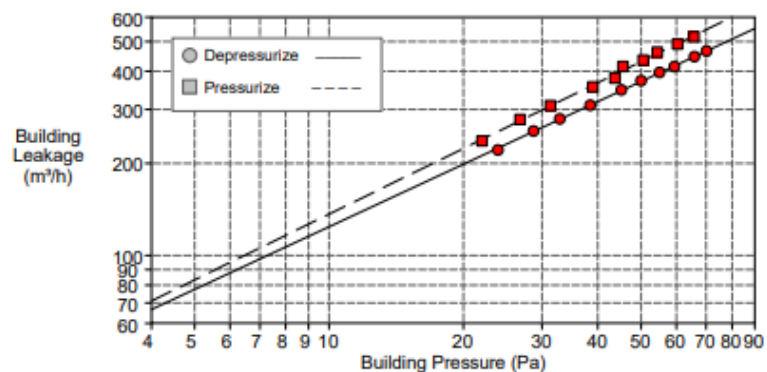
Sähköposti
etunimi.sukunimi@inmeco.fi
Ly 1637178-9
Kr 801.787

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 	Technician: Mia Maula
Test File: Lau	
Customer: 	Building Address:
Phone:	
Fax:	

	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m ³ /h)	369 (+/- 0.2 %)	430 (+/- 0.5 %)	400
n50: Air Changes per Hour (1/h)	0.72	0.84	0.78
w50: m ³ /(h*m ² Floor Area)	2.15	2.50	2.33
q50: m ³ /(h*m ² Surface Area)	0.69	0.80	0.75
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	138.2 (+/- 0.9 %)	152.4 (+/- 2.9 %)	145.3
cm ² /m ² Surface Area	0.26	0.29	0.27
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	71.6 (+/- 1.4 %)	76.5 (+/- 4.6 %)	74.0
cm ² /m ² Surface Area	0.13	0.14	0.14
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	25.2 (+/- 2.1 %)	26.4 (+/- 7.2 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	25.9 (+/- 2.1 %)	26.5 (+/- 7.2 %)	
Exponent (n)	0.679 (+/- 0.005)	0.713 (+/- 0.019)	
Correlation Coefficient	0.99976	0.99731	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		

Inside Temperature:	17 °C	Volume:	511 m ³
Outside Temperature:	-5 °C	Surface Area:	535 m ²
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	172 m ²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Protected Building	Building Dimensions:	3 %
Type of Heating:	Maalämpö vesikiertoisella la	Year of Construction:	2018
Type of Air Conditioning:	Koneellinen ilmanvaihto LTO:lla		
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Comments

Rakennuksen ilmativiysmittaus rakennusvalvonnan käyttöönottoa varten sekä energiatodistuksen lukuarvojen varmistus.

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-2.3	n/a				
-72.5	37.0	491	466	0.2	Ring B
-68.2	34.0	471	446	0.2	Ring B
-61.7	29.2	437	414	-0.2	Ring B
-57.4	26.8	418	397	0.6	Ring B
-52.3	23.6	393	372	0.8	Ring B
-47.5	20.5	366	347	0.8	Ring B
-40.8	241.4	327	310	0.1	Ring C
-35.2	198.3	295	280	0.6	Ring C
-31.0	166.3	269	255	0.7	Ring C
-26.2	126.2	233	221	-1.1	Ring C
-2.4	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -2.3 p01+ = 0.0 p02- = -2.4 p02+ = 0.0

Data Points: Pressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-1.8	n/a				
64.3	39.5	500	518	-1.2	Ring B
58.9	35.2	474	491	-0.6	Ring B
52.9	31.4	446	462	0.7	Ring B
49.1	27.3	419	434	-0.3	Ring B
44.1	25.1	400	414	2.4	Ring B
42.2	20.7	366	380	-3.4	Ring B
37.5	267.4	343	355	-2.0	Ring C
29.9	204.1	298	309	-0.7	Ring C
25.3	166.9	268	278	-0.1	Ring C
20.6	122.0	228	237	-2.4	Ring C
-1.0	n/a				

Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.8 p01+ = 0.0 p02- = -1.0 p02+ = 0.0

Liite 2. Tuloksista koottu taulukko Exceliin

Talotyyppi	Valmistusvuosi	Kerrosluke	Lämmitys	IV	US	AP	YP	Talotyyppi	yht n50	yht q50	Luokka	Vuotopaikannus	Vuotokohdat
Omakotitalo	2018	1	maailämpö, vesikiertoisella lattialämmityksellä, takka	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ höyrynsulku muovi	elementti	0.78	0.75	B	merkkisavu	pistorasiat, putkien läpiviennit, teknikka tilan läpiviennit, ikkunoiden tiivisteet, us-vs liittymä runsasta, takan läpiviennit
Omakotitalo	2018	2	vesi-ilmalämpöpumppu, vesikiertoisella lattialämmityksellä, takka	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ höyrynsulku muovi	elementti	1.21	1.42	C	merkkisavu	us nurkat, us-yp liittymät, us-yp liittymät, ovien tiivisteet, ikkunoiden tiivisteet, pistorasiat, teknisen tilan läpiviennit
Omakotitalo	2017	2	maailämpö, vesikiertoisella lattialämmityksellä	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ eriste+ höyrynsulku muovi	elementti	0.24	0.26	A	Merkkisavu	ikkunoissa tiivistevuotoja. Ulko-ovissa tiivistevuotoja. UO kynnykset
Paritalo	2017	1	maailämpö, vesikiertoisella lattialämmityksellä	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ eriste+ höyrynsulku muovi	elementti	2.09	1.85	n50-> E, q50->D	Merkkisavu	Oven karmi. Liesituuletin liittymä hs. Syöttöputkien vuodot. Sähköpääkeskus. Ikkunoiden tiivisteet. Pistorasiat.
Omakotitalo	2017	2	maailämpö, vesikiertoisella lattialämmityksellä, takka	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ selluvilla+ ilmansulkupaperi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ eriste+ ilmansulkupaperi	Pitkätavara	0.89	1.31	n50-> B, q50->C	merkkinä vahaner	?
Omakotitalo	2017	2	maailämpö, vesikiertoisella lattialämmityksellä, takka	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ eriste+ höyrynsulku muovi	Pitkätavara	0.79	0.9	B	Merkkisavu	Oven kynnykset. Ikkunoiden tiivisteet. Uunin ja takan tarkastusluukut. Ovien tiivisteet. Putki- ja johtovaraukset.
Paritalo	2017	1	vesi-ilmalämpöpumppu, vesikiertoisella lattialämmityksellä.	koneellinen tulo-poisto Ito:lla	Puurunko+ min.villa+ höyrynsulkumuovi	Teräsbetoni + eriste	NR-ristikot+ eriste+ höyrynsulku muovi	elementti	0.98	0.84	B	merkkisavu	ovien tiivistevuodot. Ovien heliat. Ovien kynnykset. Ikkunoiden tiivisteet. Pistorasiat. Ikkunoiden karmiiliittymät. Jakotukki suoja-putket vuotaa.