

Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Rakennuksen painesuhteiden pitkäaikaisseurannan hyödyt ilmavirtoja mitattaessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Rakennusmestari, LVI (AMK)
Rakennusalan työjohto
Opinnäytetyö
7.5.2021

Tekijä Otsikko	Jarkko Kemppi Rakennuksen painesuhteiden pitkäaikaisseurannan hyödyt ilmavirtoja mitattaessa
Sivumäärä Aika	36 sivua 7.5.2021
Tutkinto	rakennusmestari, LVI (AMK)
Tutkinto-ohjelma	rakennusalan työnjohto
Ammatillinen pääaine	LVI-tekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jyrki Viranko
<p>Opinnäytetyössä käsiteltiin kerrostalon painesuhteita, ilmanvaihdon tarkoituksenmukaista toimintaa sekä rakennuksen painesuhteiden pitkäaikaisseurantaa. Työ rajattiin koskemaan kerrostalokohteen ilmavirtamittausten onnistumista rakennuksessa, jossa on huoneistokohtainen tulo- ja poistoilmanvaihto. Työssä ei otettu kantaa tai tarkasteltu ilmanvaihdon oikeaa mitoituskerrostaalokohteissa, kuten kokonaisilmavirtoja tai ilman liikenopeuksia oleskeluvyöhykkeellä.</p> <p>Pääasiallisina lähteinä käytettiin voimassa olevia asetuksia ja standardeja sekä talotekniikkainfon ohjeita.</p> <p>Opinnäytetyöllä osoitettiin, että rakennuksen ilmavirtoja tasapainotettaessa tulee ottaa huomioon eri tekijät, kuten tuuli, terminen voima eli savupiippuvaikutus ja ilmanvaihto. Rakennuksen oikeanlaisilla painesuhteilla ja ilmanvaihdon tarkoituksenmukaisella toiminnalla on vaikutusta sisäilman olosuhteisiin. Painesuhteiden pitkäaikaisseuranta on hyvä tapa todeta rakennusten ilmavirtamittausten onnistuminen.</p> <p>Opinnäytetyössä esitettyjen toimenpiteiden avulla voidaan varmistaa kerrostalokohteiden ilmavirtojen mittauksen onnistuminen.</p>	
Avainsanat	ilmanvaihto, paine-ero, terminen voima, tuuli

Author Title Number of Pages Date	Jarkko Kemppi Benefits of Long-term Monitoring of Differential Air Pressure when Balancing Airflows 36 pages 7 May 2021
Degree	Bachelor of Construction Management
Degree Programme	Construction Site Management
Professional Major	HVAC Engineering
Instructor	Jyrki Viranko, Senior Lecturer
<p>This thesis studied pressure differentials in an apartment building, the correct function of the ventilation, and the long-term monitoring of pressure difference between the outside and inside air. The focus was on the ventilation of an apartment building, with apartment-specific mechanical supply and exhaust ventilation. The correct dimensioning of the ventilation system, total air flows or air velocities in the occupied zone of apartment buildings were not included in the study.</p> <p>The main sources used were the current regulations and standards and the guidelines provided by parties operating in the field of building services engineering.</p> <p>The thesis showed that when balancing the air flows of a building, various factors must be taken into account, such as wind, thermal force, i.e. the chimney effect and ventilation. It was established that good indoor air conditions are achieved in a building with the right pressure differentials and appropriate ventilation operation. Furthermore, the thesis saw that long-term monitoring of pressure ratios is a good way to verify the success of airflow measurements in buildings.</p> <p>The measures presented in the thesis can be used to ensure the successful measurement of airflows in apartment buildings.</p>	
Keywords	ventilation, pressure difference, wind, thermal force

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yritysesittely	2
3	Paine-eron syntyminen rakennuksessa	3
3.1	Luonnolliset tekijät tuuli ja terminen voima eli savupiippuvaikutus	3
3.2	Ilmanvaihdon vaikutus painesuhteisiin	6
3.3	Ilmanvaihdon, termisen voiman eli savupiippuvaikutuksen ja tuulen yhteisvaikutus painesuhteisiin	7
3.4	Rakennuksen vaipan tiiviyden vaikutus painesuhteisiin	8
4	Määräykset, tavoitteet, ohjeet painesuhteista rakennuksissa	9
4.1	Voimassa olevat määräykset ja asetukset uudessa rakennuksessa	10
4.2	Terveysturvallisuuslain (763/1994) mukaiset vaatimukset ja ohjeet rakennuksen painesuhteille:	10
4.3	Tavoitteita, ohjeita, oppaita	11
5	Ilmanvaihdon tehtävä ja toiminta	12
6	Huoneistokohtainen koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	13
7	Ilmavirtojen mittaus ja säätö	16
7.1	Ilmavirtojen mittausedellytykset ja mittavirheet	16
7.2	Ilmavirtamittarit ja oheislaitteet	17
7.2.1	Monitoimimittarit	18
7.2.2	Siipipyöräänemometri	20
7.2.3	Balometri	21
8	Tallentavat, etäluettavat mittalaitteet rakennusten paine-erojen pitkäaikaisseurantaan	21
8.1	Olosuhdeseurannan taustat	21
8.2	Etäluettavat järjestelmät	22

9	Paine-erojen mittaus rakennuksessa	23
9.1	Mittalaitteet	26
9.2	Paine-erojen hetkellinen mittaus	26
9.3	Paine-erojen pitkäaikaisseuranta rakennuksessa	27
9.3.1	Huonetilojen välisen paine-eron pitkäaikaisseuranta	28
9.3.2	Referenssilinjan paine-erojen pitkäaikaisseuranta	29
9.3.3	Termisen paine-eron huomiointi mittauksissa	31
10	Yhteenveto	32
	Lähteet	35

Lyhenteet

GSM	Global System for Mobile communication eli digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä.
IoT	Internet of Things eli esineiden internet. Tarkoitetaan järjestelmiä, jotka perustuvat teknisten laitteiden suorittamaan automaattiseen tiedonsiirtoon sekä kyseisten laitteiden etäseurantaan ja –ohjaukseen internet –verkon kautta.
LVI	lämpö, vesi, ilmastointi.
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings eli lähes nollaenergiarakennus.
RVU	Residential Ventilation Units eli asuinrakennusten ilmanvaihtojärjestelmät.

1 Johdanto

Opinnäytetyössäni käsittelen kerrostalon painesuhteita ja ilmanvaihdon tarkoituksenmukaista toimintaa sekä seikkoja, jotka vaikuttavat mittaustulosten tulkintaan ja arviointiin. Työlläni haluan osoittaa, että rakennuksen ilmavirtoja tasapainotettaessa tulee ottaa huomioon eri tekijöitä, kuten tuuli, terminen voima eli savupiippuvaikutus ja ilmanvaihto. Painesuhteiden pitkäaikaisseurannan ja hetkellisten paine-eromittausten avulla voidaan luotettavasti todeta rakennuksen ilmavirtamittausten onnistuminen. Työssäni ei oteta kantaa tai tarkastella ilmanvaihdon oikeaa mitoittamista kuten kokonaisilmavirtoja tai ilman liikenopeuksia oleskeluvyöhykkeellä. Tarkastelu keskitetään ulko- ja sisäilman sekä sisätilojen väliseen paine-eroon ja sitä kautta ilmanvaihdon tarkoituksenmukaiseen toimintaan.

Aiheen valintaan vaikutti työnantajani Bravida Finland Oy, joka esitti aihetta sen liittyessä oleellisesti yrityksen liiketoimintaan. Aihe on kokonaisuutena laaja, ja tästä syystä se on rajattu koskemaan kerrostalokohteen ilmavirtamittausten onnistumista, jossa on huoneistokohtainen ilmanvaihtokone.

Työn alussa on teoreettinen tarkastelu painesuhteiden muodostumisesta rakennuksessa. Tämän jälkeen kerrotaan käytössä olevista viranomaismääräyksistä, ohjeista ja tavoitteellisista painesuhteista rakennuksissa. Työn lopussa ennen johtopäätöksiä esitetään teoreettinen tarkastelu painesuhteiden mittaamisesta.

Ilmanvaihdon tasapainottamisen onnistuminen on ehdottoman tärkeää rakenteiden kannalta ja ennen kaikkea tilojen käyttäjien näkökulmasta. Rakennusten ilmatiiviyys on parantunut viime vuosien aikana merkittävästi. Tällä on ollut positiivinen vaikutus rakennusten energiatehokkuuteen. Rakennusten ilmatiiviyden vaikutus on alkanut näkyä joissain tapauksissa negatiivisesti rakennusten ja tilojen käyttäjille. On tapauksia, jolloin ulko- ja väliovia on ollut hankala avata tai sulkea johtuen tilan liiallisesta yli- tai alipaineisuudesta suhteessa ympäröiviin tiloihin tai ulkoilmaan. Asuntojen ollessa ylipaineisia ulkoilmaan nähden ikkunoissa esiintyy usein huurtumista ulkolasin sisäpinnoilla. Asuntojen ollessa voimakkaasti alipaineisia ulkoilmaan nähden, tämä aiheuttaa mahdollisten

epäpuhtauksien ja hajujen kulkeutumista rakenteista sekä maaperästä sisäilmaan, mikä voi heikentää sisäilman laatua.

Rakennuksen painesuhteiden tarkastelu ulko- ja sisäilman sekä mahdollisuuksien mukaan ympäröivien tilojen välillä on suoritettava ilmavirtamittausten yhteydessä. Suunniteltujen ja toteutuneiden järjestelmä- tai huoneistokohtaisten ilmavirtojen tarkastelu ei anna riittävän tarkkaa kuvaa siitä, onko rakennus käytännössä ali- tai ylipaineinen ulkoilmaan tai ympäröiviin tiloihin nähden. Rakennusten painesuhteiden mittaussarjojen tulee olla riittävän pitkiä ja mittaukset tulisi suorittaa lämmitys- ja jäähdytyskaudella. Näin voidaan arvioida, kuinka paljon ilmanvaihdon lisäksi ulkoiset tekijät kuten terminen voima sekä tuuli vaikuttavat rakennuksen tai tilojen painesuhteisiin. Painesuhteiden pitkäaikaisseuranta on hyvä tapa varmistaa ilmavirtamittausten onnistuminen.

2 Yritysesittely

Bravida on Pohjoismaiden johtava talotekniikkaan ja kiinteistöjen ylläpitoon keskittynyt asennus- ja huolto-yhtiö. Bravida toimii yli 160 paikkakunnalla Ruotsissa, Norjassa, Tanskassa ja Suomessa. Bravidan taloteknisissä palveluissa työskentelee yhteensä noin 12 000 ammattilaista. Suomessa Bravida on toiminut vuodesta 2015 lähtien työllistäen noin 650 ammattilaista.

Bravida tarjoaa erikoispalveluita sekä kokonaisratkaisuja sähkö-, lämpö-, vesi-, viemärinti-, ilmanvaihto-, jäähdytys-, sprinkler-, rakennus-, automaatio- ja turvallisuustekniikoissa. Bravidan palvelut kattavat talotekniikan koko elinkaaren suunnittelusta asennukseen, huoltoon ja ylläpitoon. Tavoitteena on tuottaa asiakkaille kokonaisvaltaisia kiinteistön ylläpidon ja urakoinnin palveluja tilaajan tavoitteet ja kiinteistön elinkaari huomioiden.

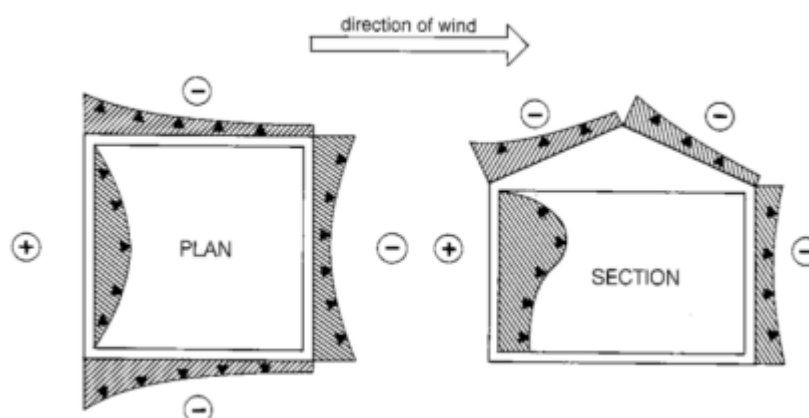
Bravida Finland Oy:llä on toimipaikkoja Helsingissä, Hangossa, Billnäsissä, Tampereella, Akaassa, Jyväskylässä, Jämsässä, Kuopiossa, Pietarsaassa, Kokkolassa, Vaasassa ja Seinäjoella.

3 Paine-eron syntyminen rakennuksessa

Paine-erojen muodostumiseen rakennuksen ulkovaipan yli vaikuttaa osaltaan myös rakennuksen ulkovaipan tiiviys. Paine-erojen muodostumiseen rakennuksen ulkovaipan yli vaikuttaa kolme keskeistä tekijää. Tekijät, jotka vaikuttavat tähän, ovat tuulenpaine eri julkisivuilla, terminen voima ja rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä. [1; 2.]

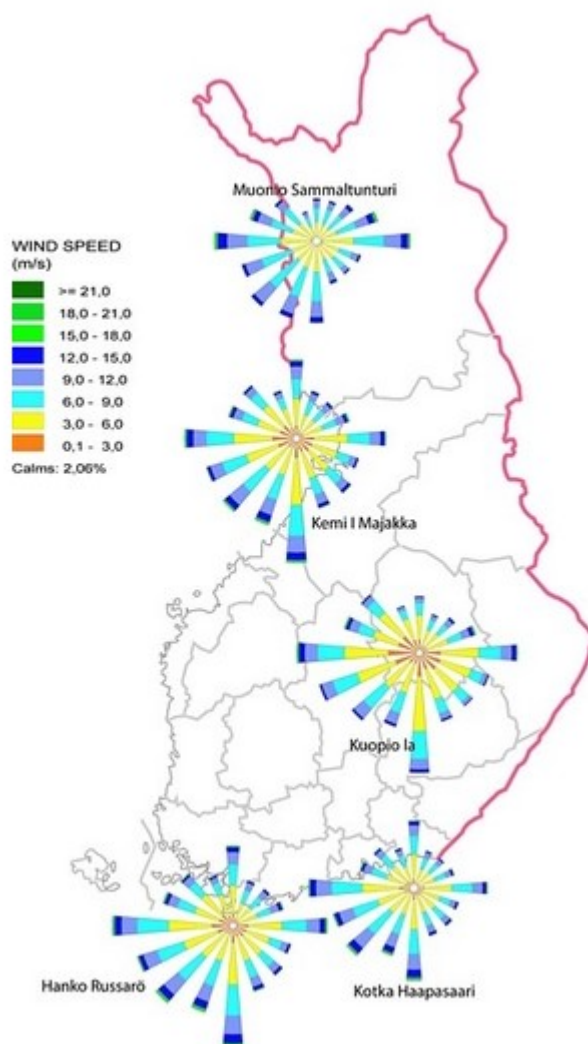
3.1 Luonnolliset tekijät tuuli ja terminen voima eli savupiippuvaikutus

Tuulen nopeus ja suunta vaikuttavat rakennuksen vaipan yli mitattavaan paine-eroon. On vaikeaa laskea tuulen vaikutusta rakennuksen paine-eroihin rakennetussa ympäristössä, jossa rakennukset aiheuttavat pyörteitä ja näin muuttavat tuuliprofiilia. Kuvassa 1 on esitettyä tuulen aiheuttama paine-ero rakennuksen eri julkisivuilla. Tuulen vaikutus rakennukseen määräytyy ympäristöstä ja rakennuksen muodosta sekä tuulen suunnasta ja voimakkuudesta. [1; 2.]



Kuva 1. Tuulen aiheuttama paine-ero rakennuksen vaaka- ja pystyleikkauksessa [2].

Suomessa tuulee selvästi vähemmän kesäkuukausina kuin talvikuukausina. Atlantilta suuntautuvat matalapaineet sekä niiden kulkemat reitit vaikuttavat maantieteellisen sijaintimme vuoksi voimakkaasti tuulioloihin Suomessa. Tarkasteltaessa kuvan 2 tuuliruuksuja voidaan havaita, että Suomessa vallitsevat lounaistuulet. [3.]

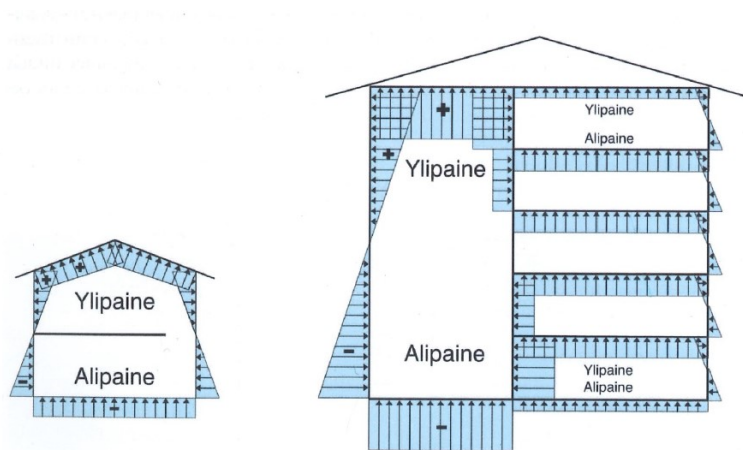


Kuva 2. Tuulen suunnan ja nopeuden jakauma eräillä sääasemilla tuuliruusuilla kuvattuna. Tarkastelujakso 1999–2008 [3].

Rakennuksen sisäpuoliseen paineeseen vaikuttavat vallitseva tuulen suunta ja rakennuksen aukkojen sijainti. Rakennuksen sisäpuolelle muodostuu ylipaine, mikäli rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on muita seiniä epätiivimpi. Alipaine muodostuu rakennuksen sisälle, jos suurin osa aukoista on suojan puoleisella seinällä. [4, s. 120.]

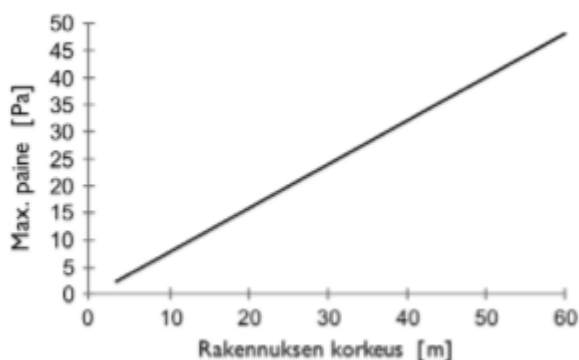
Rakennuksen tuulenpuoleisen seinän ollessa epätiivimpi kuin muut seinät. Rakennuksen sisälle muodostuu ylipaine. Jos suurin osa aukoista sijaitsee suojan puoleisella seinällä, rakennuksen sisälle muodostuu alipaine. Tuulen suunta, rakennuksen geometria ja rakenteen ilmatiiviyys vaikuttavat siihen, kuinka tuuli vaikuttaa rakennuksen paine-eroihin. [5.]

Rakennuksen ulkovaipan yli muodostuvaan paine-eroon vaikuttaa ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero. Tätä termisten voimien aiheuttamaa paine-eroa kutsutaan savupiippuvaikutukseksi. Rakennuksen sisäilman ollessa ulkoilmaa lämpimämpää kohdistuu rakennuksen sisäpuolella sen alaosiin alipaine ja yläosiin ylipaine ulkoilmaan verrattuna, kuvan 3 mukaisesti. Rakennuksen neutraaliakselilla ulko- ja sisäilman välinen paine-ero on 0 Pa. Sijaintia on vaikea määrittää, koska neutraaliakselin paikka riippuu rakennuksen epätiiviyksreittien kohdista sekä niiden virtausvastuksista ja nämä voivat vaihdella satunnaisesti. [4, s. 120.]



Kuva 3. Sisä- ja ulkoilman lämpötilaerojen seurauksena syntymä painejakauma rakennuksen ulkovaipan yli [4, s. 120].

Sisäpuolinen ylipaine nousee neutraaliakselilla noin 0,9 Pa metriä kohden, kun ulko- ja sisäilman välinen lämpötila-ero on 20 °C. Kuvan 4 avulla voidaan tarkastella termisen voiman aiheuttamaan ylipainetta erikorkuisissa rakennuksissa. Neutraaliakselin ollessa rakennuksen alaosassa rakennus on koko matkaltaan ylipaineinen ulkoilmaan nähden. Termisen voiman vaikutus on suurin talviaikaan, jolloin ulko- ja sisäilman välinen paine-ero on suurin. [4, s. 120–121.]



Kuva 4. Suurin savupiippuvaikutuksen aiheuttama ylipaine erikorkuisissa rakennuksissa, kun lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on 20 °C [4, s. 121].

Rakennuksen vaipan yli mitattavaan paine-eroon vaikuttaa eri vuodenaikojen lisäksi vuorokaudenaika. Ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero yöllä ja päivällä voi vaihdella suuresti. Paine-ero rakenteiden yli on kylmänä talvi-, syys- tai kevätyönä suurempi kuin talvi-, syys- tai kevätpäivänä. Päivällä aurinko lämmittää ulkoilmaa, jolloin ulko- ja sisäilman välinen paine-ero on pienempi. [6, s. 19.]

3.2 Ilmanvaihdon vaikutus painesuhteisiin

Rakennusten ulko- ja ulospuhallusilmavirrat on suunniteltava tasapainoon. Tällä pyritään estämään, ettei alipaineen johdosta sisäilmaan siirry epäpuhtauksia ulkoilmasta, maaperästä tai vaurioituneista materiaaleista, eikä rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta pääse syntymään ylipaineesta johtuen. Eri alojen suunnittelijoiden on otettava tehtäviensä mukaisesti huomioon, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle toteutuvat. Vaipan ja sisärakenteiden ilmanpitävyys sekä terminen voima on otettava erikoissuunnittelussa huomioon. Rakennuksen ilmavirtojen on virrattava puhtaasta tilasta sisäilmaltaan likaisempaan tilaan, kuten asuinhuoneesta aputiloihin. [7.]

Ulko- ja ulospuhallusilmavirrat tulee pitää tasapainossa, ettei ilmanvaihtojärjestelmä aiheuta haitallista yli- tai alipainetta rakennuksen ulkovaipan ylitse. Ilmanvaihtojärjestelmän avulla tulee kyetä ylläpitämään suunnitellut ilmavirrat. [8.]

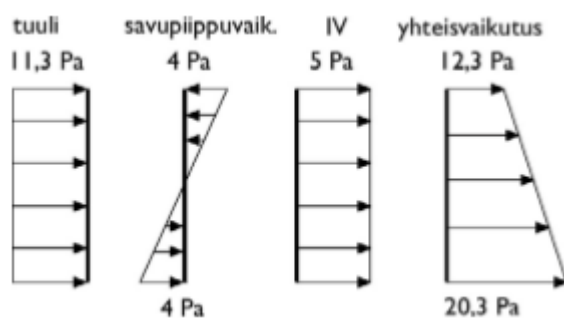
Ilmanvaihtojärjestelmä koostuu ilmanvaihtokoneesta ja ilmanvaihtokanavistosta varusteineen. Ilmanvaihtojärjestelmän suunniteltu painetaso tuotetaan ilmanvaihtokoneella.

Rakennuksen paineolosuhteet muodostuvat ilmanvaihtojärjestelmään määritettyjen ulko- ja ulospuhallusilmavirtojen massatasapainon perusteella. Ilmavirtojen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon ilman tiheyseroista johtuvat painesuhteiden muutokset kanavapaineissa eli dynaamisen paineen nousu samalla puhaltimen paineenkorotuksella ja sen vaikutus ilmavirtoihin.

Käytettäessä koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtoa saadaan muodostettua selkeää paine-ero ulko- ja sisäilman välille. Ilmanvaihtuvuus rakennuksessa saadaan aikaiseksi ilmanvaihtokoneessa olevilla tulo- ja poistoilmapuhaltimilla. Tuulen ja termisen voiman vaikutus on pienempi koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon rakennuksissa, kuin rakennuksissa joissa on koneellinen poistoilmanvaihto tai painovoimainen ilmanvaihto. [6, s. 13–14.]

3.3 Ilmanvaihdon, termisen voiman eli savupiippuvaikutuksen ja tuulen yhteisvaikutus painesuhteisiin

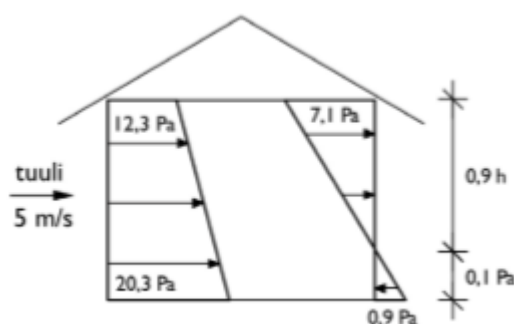
Painesuhteiden kokonaistarkastelussa otetaan huomioon ilmanvaihdon, termisen voiman ja tuulen yhteisvaikutus. Kuvassa 5 esitetään eri tekijöiden vaikutus rakennuksen painesuhteiden muodostumiseen tuulenpuoleisella ulkoseinällä.



Kuva 5. Tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutus tuulenpuoleiseen ulkoseinään kohdistuvaan paineeseen [4, s. 122].

Kuvassa 6 on esitetty painejakaumat rakennuksen tuulen- ja suojanpuoleisiin seiniin, kun rakennukseen kohdistuva tuulennopeus on 5 m/s. Ulkoilman lämpötila on 0 °C, sisäilman lämpötila on +20 °C ja rakennuksen vapaa ilmatila on 10 m. Rakennuksessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Ilmanvaihtokoneelle suunnitelluilla ilmavirroilla

muodostuu rakennukseen -5 Pa :n alipaine ulkoilmaan nähden. Eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta tuulenpuoleiselle seinälle muodostuu rakennuksen vaipan sisäpuolelle alipaine. Alipaine on seinän alaosassa huomattavasti yläosaa suurempi. Rakennuksen vastakkaiselle seinälle muodostuu vastaavasti yläosaan ylipainetta ja alaosaan alipainetta sisätilaan nähden. [4, s. 122–123.]



Kuva 6. Rakennuksen tuulen- ja suojanpuoleisiin seiniin tuulesta, savupiippuvaikutuksesta ja ilmanvaihdosta kohdistuvat painejakaumat [4, s.122].

3.4 Rakennuksen vaipan tiiviiden vaikutus painesuhteisiin

Rakennuksen ja rakenneosien tiiviydellä on suora vaikutus rakennuksen painesuhteisiin. Parantamalla ulkovaipan ilmanpitävyyttä saavutetaan positiivisia vaikutuksia rakennuksen energiatehokkuudelle. Rakenteen tiiviiden ansioista ilmavirtojen mittausta ja säätöä sekä tavoiteltujen painesuhteiden toteaminen on helpompaa rakenteiden vuotoilman ollessa pienempi. Ulkovaipan tiiviiden vuoksi rakennuksen painesuhteiden kuntoon saattaminen on tärkeää, etteivät ilmanvaihdon synnyttämät paine-erot nouse liian suuriksi. [9.] Rakennuksen tulee olla tiivis, jolloin suunnitelmien mukainen tuloilmavirta saadaan siirrettyä hallitusti haluttuun tilaan ilmanvaihdon avulla. Hyvien sisäilmasto-olosuhteiden muodostumiseen vaikuttavat oleellisesti rakennuksen paine-erot, painesuhteet ja rakennuksen tiivisyys ja lämpöolot.

Epätiivisiin rakennuksen ulko- ja sisäilman välinen paine-ero on sitä vähäisempi, mitä epätiivimpi rakenne on. Epätiivisissä rakennuksissa paine-erot pääsevät tasaantumaan epätiiviesreitien kautta. Vastaavasti taas rakennuksissa, joissa ilmanpitävyys on hyvä,

paine-erovaihtelut ovat huomattavasti suurempia kuin rakennuksissa joiden rakenne on epätiivis. Rakennuksen ulkovaipan rakenteen omatessa hyvän ilmatiiviyden, saavutetaan sitä kautta energian säättöä ja sisäilman olosuhteet pysyvät hyvällä tasolla. Ulkovaipan hyvän ilmatiiviyden avulla rakenteiden kosteustekninen toiminta on tarkoituksenmukaisempaa. Tuuli ja terminen voima eli savupiippuvaikutus aiheuttavat rakennukseen alitai ylipaineisuutta. [4, s. 86–88; 6, s. 19–20.]

4 Määräykset, tavoitteet, ohjeet painesuhteista rakennuksissa

Ilmanvaihdonmitoitusta ja rakennuksen painesuhteiden toteutumista tarkastellaan sen hetkisten rakentamismääräysten perusteella, jotka ovat olleet voimassa rakennusluvan myöntämisaikana, jos muuta ei ole sovittu. Voimassa olleet määräykset ja asetukset määrittävät vähimmäisvaatimukset rakennuksen ilmanvaihdolle ja painesuhteille, jotka vähintään tulee täyttyä. Suoritettaessa terveydensuojelulain (763/1994) mukaista terveydensuojeluviranomaisen määräämää selvitystä terveyshaitasta rakennuksessa, sovelletaan ilmanvaihdon ja painesuhteiden toimivuuden arvioinnissa kulloinkin voimassa olevaan sosiaali- ja terveysministeriön asetusta.

Suomessa on tyyppillisesti normaalikäytössä olevat rakennukset suunniteltu lievästi alipaineisiksi ulkoilmaan nähden, ennen vuoden 2018 alussa voimaan tullutta ympäristöministeriön asetusta (1009/2017) uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Rakennusten lievällä alipaineella pyrittiin ehkäisemään rakennuksen vaipan epäjatkuvuuskohdista rakenteeseen työntyvää sisäilmaa, joka aiheuttaisi rakenteelle ylimääräistä kosteusrasitusta [4, s. 118–122].

Uudessa ympäristöministeriön asetuksessa (1009/2017) todetaan, että rakennusten normaalikäytöllä ilmavirrat tulisi suunnitella tasapainoon. Tässä yhteydessä normaalikäytöllä tarkoitetaan tavanomaisia asuin-, toimisto- ja koulurakennuksia.

4.1 Voimassa olevat määräykset ja asetukset uudessa rakennuksessa

Ympäristöministeriön asetuksessa (1009/2017) uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta todetaan, että rakennusten ulko- ja ulospuhallusilmavirrat tulisi suunnitella tasapainoon. Samansuuntainen suunnitteluohje annetaan talotekniikkainfon oppaassa, joka on tehty ympäristöministeriön asetuksen (1009/2017) soveltamisen tueksi.

Ympäristöministeriön asetuksessa (1009/2017) uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta todetaan seuraavaa:

Erytysuunnittelijan 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 tehtävänsä mukaisesti suunniteltava rakennuksen vaipan ja sisärakenteiden 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. [7, s. 8.]

4.2 Terveydensuojelulain (763/1994) mukaiset vaatimukset ja ohjeet rakennuksen painesuhteille:

Olemassa olevien rakennusten ilmavirtojen ja painesuhteiden tarkasteluun on olemassa sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/2015). Asetusta (545/2015) sovelletaan asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisten olosuhteiden valvontaan terveydensuojelulain (763/1994) nojalla.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (545/2015) ilmanvaihdosta lausutaan seuraavaa:

Terveyshaitta on arvioitava kokonaisuutena siten, että altisteen toimenpiderajaa sovellettaessa otetaan huomioon altistumisen todennäköisyys, toistuvuus ja kesto, mahdollisuudet välttää altistumiselta tai poistaa haitta sekä poistamisesta aiheutuvat olosuhteet ja muut vastaavat tekijät [10].

Sovellettaessa tässä asetuksessa tarkoitettuja fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia tekijöitä koskevia vaatimuksia tavanomaisesta poikkeavissa oloissa, kuten rakennuksen tai sen osan korjauksen tai muutostyön aikana, on otettava huomioon erityisesti altistuksen kesto ja mahdollisen terveyshaitan toteutumisen riski [10].

Ilmanvaihdon ulkoilmavirran tulee olla rakennuksen käytön mukaisesti riittävä ja sen laadun tulee olla riittävän puhdasta. Ilmanvaihto tulee järjestää siten, että sisäilma vaihtuu koko oleskeluvyöhykkeellä. Riittämätön ilmanvaihto ei saa aiheuttaa 5 §:ssä tarkoitettua mikrobikasvun riskiä. [10.]

Valvira on laatinut asumisterveysasetuksen (545/2017) soveltamisohjeen. Soveltamisohjeessa esitetään selkeitä tulkintoja ja esimerkkejä asumisterveysasetuksen soveltamiseen. Asumisterveysasetuksen (545/2015) soveltamisohje on tehty kuntien terveydensuojeluviranomaisille ja muille alan asiantuntijoille.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa (Valvira 2016) todetaan painesuhteista seuraavaa:

Rakennuksen ali/ylipaineisuus vaikuttaa mm. vuotoilmavirran suuntaan ja huoneilman kosteuden tiivistymisriskiin pinnoilla tai rakenteissa. Jos rakennus on ylipaineinen ulkoilmaan nähden ilmanvaihdon toiminnasta johtuen, tulee ylipaineen syy selvittää ja ilmanvaihtoa tasapainottaa. Hetkellinen ylipaineisuus on mahdollista tuuliolosuhteista tai rakennuksen geometriasta johtuen, eikä vaadi korjaustoimenpiteitä. Jos alipaineisuus on yli 15 Pa, niin alipaineisuuden syy tulee selvittää ja ilmanvaihtoa mahdollisuuksien mukaan tasapainottaa. Tällä vähennetään vuotoilmavirtauksia ja niiden mukana kulkeutuvia epäpuhtauksia. Rakennuksen geometria tai tuuliolosuhteet voivat myös aiheuttaa alipaineisuutta, jota voi olla vaikea korjata. [11, s. 18].

4.3 Tavoitteita, ohjeita, oppaita

Talotekniikkainfon sisäilmasto ja ilmanvaihto-oppaassa, joka on päivitetty 10.6.2020, lausutaan seuraavaa:

Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävä on ylläpitää suunnitelmissa esitetyt ilmavirrat. On myös olennaisen tärkeää, että tulo- ja poistoilmavirrat ovat keskenään tasapainossa, jotta ilmanvaihtojärjestelmä ei aiheuta rakennuksen vaipan yli haitallista paine-eroa kumpaankaan suuntaan. Pelkällä poistoilmavaihdolla varustettujen tilojen korvausilmareitit tulee mitoittaa siten, että mitoitusilmavirralla niiden painehäviö on enintään 10 Pa. Rakennuksen vaipan yli vaikuttavan paine-eron seurantaan varten rakennus tulee varustaa riittävällä määrällä jatkuvatoimisia paine-erolähettämiä, joiden mittauksista on hyvä kerätä trenditietoa. [12.]

A-Insinöörit Oy on laatinut rakennusten paine-erojen mittausohjeen, joka päivitetty 14.10.2019. Rakennusten paine-erojen mittausohjeen loppuraportti on tehty ympäristöministeriön toimeksiannosta. Mittausohjeessa esitetään hyväksi havaittuja tapoja rakennusten painesuhteiden toteamiseen.

Rakennusten sisäilmaongelmien kanssa tekemisissä oleville kuntotutkijoille ja muille asiantuntijoille on suomen ympäristöministeriön rahoituksella laadittu opas, rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus.

Ympäristöministeriön ympäristöoppaassa 2016 todetaan painesuhteista seuraavaa:

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2(RakMK D2-2012) mukaan ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava siten, ettei se aiheuta vesi-, kosteus- tai muita vahinkoja. Rakennustekniikan kannalta ohje tarkoittaa, että lämpimiä sisätiloja ei tule ilmanvaihtoteknisesti ylipaineistaa. Tavoitteellinen paine-ero ulkovaipan yli on koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa rakennuksissa 0...- 2 Pa ja paine-ero rappukäytävään +/- 0 Pa. [4, s. 121.]

5 Ilmanvaihdon tehtävä ja toiminta

Ilmanvaihdon tulee olla käyttötarkoitukseen ja käyttäjämääriin nähden tarkoituksenmukainen, ja ulkoilman on oltava riittävän puhdasta. Ilmanvaihdon päätehtävänä on poistaa sisäilman epäpuhtaudet ja tuoda tilalle puhdasta ulkoilmaa. Riittämättömän ilmanvaihdon vuoksi sisäilmaan voi kertyä epäpuhtauksia, jotka voimistavat erityyppisten epäpuhtauksien aiheuttamia terveys- ja viihtyvyyshaittoja. Tyypillisesti heikko ilmanvaihto voi johtaa ihmisistä, toiminnoista, vaurioituneista ja vaurioitumattomista materiaaleista olevien epäpuhtauksien sekä kosteuden kertymiseen sisäilmaan. [4, s. 82–86.] Kaikkia rakennuksessa syntyneitä epäpuhtauslähteitä ei voida poistaa. Tästä syystä tarvitaan riittävä yleisilmanvaihto rakennuksissa. [13.]

Ilmanvaihdon toiminnan perusta on paine-ero. Rakennuksen painesuhteet määräytyvät tuulen, termisen voiman ja ilmanvaihdon sekä tilojen käytön yhteisvaikutuksesta. Tyypillisesti painesuhteet vaihtelevat, ja ne voivat muuttua nopeasti ja voimakkaasti. Paineerojen seurauksena ilma virtaa esimerkiksi huonetilasta toiseen, rakennuksen eri kerrosten välillä tai ulkovaipparakenteiden läpi. [13.]

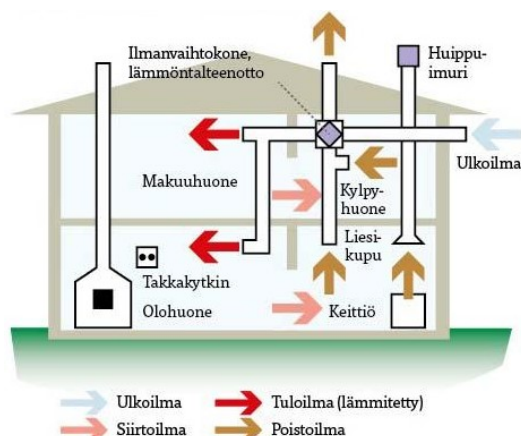
6 Huoneistokohtainen koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto yleistyi Suomessa 1970-luvulla. Samalla rakennuksiin alettiin kehittämään myös poistoilman lämmöntalteenottolaitetta. Huoneistokohtaiset tulo- ja poistoilmanvaihtokoneet alkoivat tulla asuintaloihin 1990-luvulla. 1970- ja 1990-luvun välisenä aikana koneellisia tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmiä käytettiin lähinnä keskitettyinä järjestelminä. [14, s. 116.] Asuinkerrostaloissa on käytetty periaatteiltaan vastaavia ilmanvaihtojärjestelmiä kuin pien- tai rivitaloissa.

Vuosien mittaan tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmät ovat kehittyneet huomattavasti. EU:n ekosuunnitteludirektiivi (2009/125) EY:n ensimmäinen vaihe tuli voimaan 1.1.2016. Ekosuunnitteludirektiivin toinen vaihe astui voimaan 1.1.2018, jolloin vaatimukset tiukentuvat lisää verrattuna vuoden 2016 direktiiviin. Direktiivillä pyritään vähentämään maailmanlaajuisesti energiankulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Ekosuunnitteludirektiivi velvoittaa ilmanvaihdonpuhaltimilta ja lämmöntalteenottolaitteilta parempaa hyötysuhdetta. Asuinrakennuksien ilmanvaihtokoneet ovat luokassa RVU (residential ventilation units). [15.]

Ilmanvaihtokoneissa on tyypillisesti lämmöntalteenottolaitteena pyörivä lämmönsiirrin, ristivirtalämmönsiirrin tai vastavirtalämmönsiirrin. Lämmönsiirtimen avulla otetaan talteen ilmassa oleva lämpö, jotta se ei menisi hukkaan. [16.]

Tulo- ja poistoilmanvaihdossa tuloilma tuodaan olo- ja makuuhuoneisiin rinnastettaviin tiloihin. Poistoilmalaitteet yleensä sijoitetaan likaisiin tiloihin, kuten keittiöön, vaatehuoneeseen ja kylpyhuoneeseen. Likaisissa tiloissa kosteus-, haju- ja pölykuorma on yleensä suurempi, kuin muissa asuintiloissa. Kuvassa 7 on esitetty yhdenlainen tulo- ja poistoilmanvaihtoratkaisu asunnossa.



Kuva 7. Asuntokohtainen tulo- ja poistoilmavaihto [17].

Ilmavirtojen mitoitus on yleensä helppoa huoneistokohtaisissa ilmanvaihtokoneissa, koska ilmanvaihtokanavisto on rakenteeltaan yksinkertainen. Ei kuitenkaan voida taata, että painesuhteet ja ilmavirrat pysyisivät aina suunnitellulla tasolla näissäkään järjestelmissä. Suodattimien likaantuminen huoneistokohtaisissa ilmanvaihtokoneissa vaikuttaa ilmavirtoihin, koska näissä ei useinkaan ole kanavapainesäätöä eli järjestelmä ei kompensoi lisääntyviä painehäviöitä. Järjestelmissä käytetään yleisesti suodattimina pienikokoisia tasosuodattimia, niin tulo-, kuin poistoilmapuolella. Suodattimet likaantuvat nopeasti, ja ne tulisi vaihtaa 3 kk:n välein, vaikka yleinen suositus vaihtovälille on 6 kk. Asuinkerrostaloissa suodattimien vaihto on joko annettu asukkaiden tehtäväksi tai vastaavasti sovittu, että huoltoyhtiö vaihtaa suodattimet kaksi kertaa vuodessa. Nämä toimenpiteekään eivät riitä siihen, että rakennuksen painesuhteet ja ilmavirrat pysyisivät suunnitellulla tasolla. [18, s, 17.]

Lämmöntalteenoton huurtumisenestojärjestelmät huoneistokohtaisissa ilmanvaihtokoneissa toteutetaan usein siten, että tuloilmapuhallin sammutetaan tai ohjataan minimi-kerrosluvulle. Tämä johtaa asunnon voimakkaaseen alipaineistumiseen ulkoilmaan nähdessä sulatusjakson aikana. [18, s, 17.]

Uudessa ympäristöministeriön asetuksessa (1009/2017) on esitetty, että tulo- ja poistoilmavirtoja tulee voida tehostaa vähintään 30 % suuremmaksi kuin suunnitellun käyttöajan ilmavirrat. Ilmanvaihtojärjestelmän toimiessa uuden asetuksen mukaisesti asunnon ja ulkoilman välisen paine-eron pitäisi pysyä muuttumattomana ilmanvaihdon käytötavasta riippumatta.

Suomessa keittiö on yleisesti varustettu liesikuvulla, jonka kautta ruuan laitosta syntyvät epäpuhtaudet poistetaan asunnosta. Liesikupujen ilmavirrat ovat yleensä -8 l/s ja -25 l/s. Liesikuvun -8 l/s on osa asunnon yleispoistoilmavirtaa, joka voidaan ottaa joko liesikuvulta tai erillisen poistoilmaventtiin kautta, joka sijaitsee asunnon keittiössä. Liesikuvun tehostusilmavirralla -25 l/s on saatu aikaiseksi esitetty 30 %:n muutos huoneiston kokonaispoistoilmavirrassa. Tulo- ja poistoilmavirtojen suunniteltu tasapaino liesikuvun tehostustilanteessa kompensoidaan nostamalla tuloilmapuhaltimen nopeutta tasapainotilanteen saavuttamiseksi. Ilmanvaihtokoneissa on automaattinen liesikupu toiminto, joka tasapainottaa ilmanvaihtoa liesikupua käytettäessä.

Liesikuputehostus ei ole ainoa tapa saada aikaiseksi 30 %:n muutosta asunnon kokonaisilmavirrassa. Liesikuputehostuksen lisäksi asuntojen ilmanvaihtokoneissa on tyypillisesti käytössä vähintään kolme erillistä nopeutta: kotona, poissa ja tehostus. Ilmanvaihdon tehostustoiminnolla saadaan aikaiseksi 30 %:n muutos asunnon kokonaisilmavirrassa. Ilmanvaihdon tehostuskäytölle ilmanvaihtokoneen automatiikkaan asetetaan erikseen ilmanvaihtosuunnitelman mukaiset tehostusilmavirrat tulo- ja poistoilmapuhaltimelle, joilla tarvittava muutos saavutetaan.

Asunnossa voi olla liesikuvun ohjaukseen erillinen huippumuri. Tässä tapauksessa liesikuvun kautta poistettava ilmavirta ei mene ilmanvaihtokoneen lävitse. Tällaisissa tapauksissa on tärkeää muistaa, että ilmanvaihtokoneen ilmavirtoihin tehdään kompensointi, joka pudottaa poistoilmapuhaltimen nopeutta estäen liiallisen alipaineen syntymistä asunnon ja ulkoilman välille. Toinen vaihtoehto on, että tuloilmapuhaltimen nopeutta nostetaan ilmanvaihdon tasapainotilanteen saavuttamiseksi. Tätä vaihtoehtoa käytettäessä on vaarana, että talvella ulkoilman lämpötilan ollessa matala, tuloilma ei lämpeä tarpeeksi ilmanvaihtokoneessa. Tässä tapauksessa sisätiloihin puhallettavan tuloilman lämpötila laskee ja aiheuttaa tilojen käyttäjille vedon tunnetta.

7 Ilmavirtojen mittaus ja säätö

Rakennuksen ulkoilmavirta ja ulospuhallusilmavirta suunnitellaan yleensä tasapainoon staattisessa tilanteessa, ellei toisin edellytetä johtuen rakennuksen erityispiirteistä. Ilmanvaihtojärjestelmä säädetään staattiseen tilanteeseen rakennuksen valmistumisvaiheessa. [12.]

Selvitettäessä ilmanvaihdon suunnitelman mukaista toimintaa ilmavirtoja mitataan ilmanvaihtokanavistosta ja ilmanvaihdon päätelaitteista [19, s. 8].

Ilmavirtojen mittaus suoritetaan ympäristöministeriön asetuksen (1009/2017) mukaisesti. Asetuksessa on esitetty ilmavirtojen hyväksytyt poikkeamat mitatuissa ilmavirroissa ilmastointilaitoksissa.

Talotekniikkainfo on julkaissut soveltamisoppaan ympäristöministeriön asetukseen (1009/2017). Soveltamisohjeessa on opastava teksti, koskien ilmanvaihtojärjestelmän käyttöönoton mittauksia.

LVI-kortissa 014-10290 [19] esitetään, kuinka suoritetaan LVI-laitosten LVI-tekniisiä mittauksia ja standardissa SFS-EN 12599 [20] esitetään rakennusten ilmastointi- ja ilmanvaihtojärjestelmien luovutukseen liittyvät testimenettelyt ja mittausmenetelmät.

7.1 Ilmavirtojen mittausedellytykset ja mittavirheet

Ilmavirtojen mittausta varten on tärkeää valita käyttötarkoitukseen soveltuva, kalibroitu mittari ja mittaukset suoritetaan mittaushjeita noudattaen. Ilmavirtamittareille tärkeitä ominaisuuksia ovat mittarin mitta-alue, erottelukyky, vasteaika, kenttäkelpoisuus, tiedon-siirto-ominaisuudet ja automatisointimahdollisuus rekisteröitäviä mittauksia varten. [19, s. 2.]

Ilmavirtojen mittauksia suoritettaessa tulee varmistaa, että mittausedellytykset toteutuvat. Ilmanvaihtojärjestelmän täytyy toimia normaalisti, ja tulee varmistaa sellaisten ovien ja ikkunoiden olevan kiinni, jotka normaalissa käyttötilanteessa olisivat suljettuina. Näillä

toimenpiteillä varmistetaan, että mittaustulokset kuvaavat mahdollisimman tarkasti normaalia käyttötilannetta. [19, s. 2.] Ilmavirtojen mittaus suoritetaan ilmanvaihtokoneelta, ilmanvaihtokanavistosta, kanavalaitteista tai ilmanvaihdon päätelaitteista. Ilmavirtojen mittaus ilmanvaihtokanavasta suoritetaan kiinteistä mittalaitteista kanavistossa tai ilmavirran keskinopeusmittauksella kanavasta. Ilmanvaihdon päätelaitteista ilmavirta mitataan mittayhteistä paine-eromenetelmän avulla.

LVI-kortissa 014-10290 [19] esitetään, kuinka kokonaismittausvirhe koostuu mittalaitteen, mittaustavan ja lukemavirheen kokonaisuudesta. Kokonaisvirhe \bar{m} voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\bar{m} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} \% \quad (1)$$

missä,
 m_1 = mittalaitteen virhe (%)
 m_2 = mittaustavan virhe eli menetelmävirhe (%)
 m_3 = lukemavirhe (%)
 [19]

Mittausepävarmuutta käsitellään laajemmin standardissa SFS-EN 12599 [20]. Standardissa käsitellään laajasti tekijöitä, joista mittausepävarmuus muodostuu. Standardi sisältää laskukaavat, jonka avulla voidaan määrittää odotettavissa olevaa mittausepävarmuutta laitteille ja järjestelmille.

7.2 Ilmavirtamittarit ja oheislaitteet

Nykyään on saatavilla erityyppisiä mittalaitteita ilmavirtojen mittausta varten. On olemassa erilaisia monitoimimittareita, jotka sopivat tarkkaan ilmanvaihdon mittaamiseen. Mittareilla voidaan lisäksi tallentaa mittaukset ja jopa tallentaa pidempiä jaksoja. Monitoimimittareilla voidaan myös suorittaa erityyppisiä sisäilman laadun mittauksia.

Monitoimimittarit sisältävät usein omat ohjelmistot, joiden avulla voidaan tarkastella ja luoda erilaisia mittaustuloksia havainnollistavia kaavioita ja taulukoita. Joissain malleissa mittauksista voidaan suoraan tulostaa pöytäkirjat ja raportit. Raportteihin voidaan suoraan lisätä tarvittavat valokuvat monitoimimittarin omien sovellusten avulla.

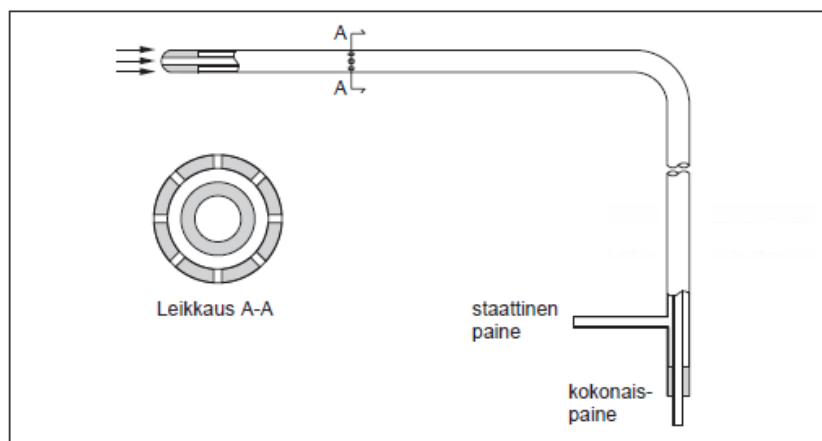
7.2.1 Monitoimimittarit

Kuvan 8 mukaisilla monitoimimittareilla mitataan staattista painetta sekä paine-eroa ja siihen voidaan liittää erilaisia mittauselementtejä mittarityypistä riippuen. Tyypillisesti il-mavirtamittauksissa käytetään apuna mittaletkuja, mittasondia, pitot-putkea sekä kuumalanka-anturia.



Kuva 8. Teston monitoimimittari LVI-mittauksiin [Testo 2020].

Virtauspaineeseen perustuvat mittauselementit ovat pitot-putki ja keskinopeusanturit. Pitot-putken toiminta perustuu virtauksen kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksen mittaamiseen. Mittaus pitot-putkella suoritetaan virtausta vasten kuvan 9 mukaisesti. Keskinopeusanturilla otetaan huomioon virtauspoikkipinnassa tapahtuva olosuhteiden muuttuminen. Keskinopeusanturi voi olla ristiputki tai vaikka tanko. [19, s. 8.]



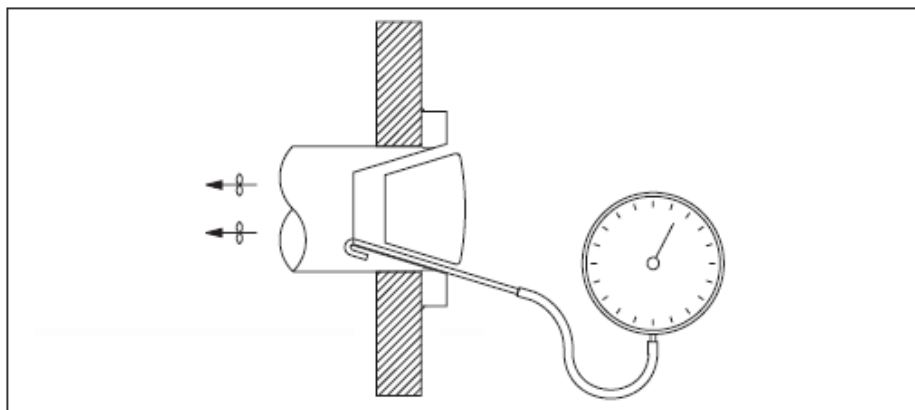
Kuva 9. Pitot-putki [19, s. 8].

Ilmavirtauksia ilmanvaihtokanavistosta tai erityyppisten tulo- ja poistoilmasäleiköiden ilmavirtoja voidaan mitata anturin jäähtymiseen perustuvilla mittauselementeillä. Mittaus-elementin toiminta perustuu ytimeen, jonka muodostaa lanka, joka on kierretty sydänai- neen ympärille ja peitetty metalli- tai keramiikkakerroksella. Mittauksella määritetään il- man nopeus useasta pisteestä ja lasketaan näistä keskiarvo. Kuvassa 10 on esitettyinä yhdentyypinen kuumalanka-anturi.



Kuva 10. Teston kuumalanka-anturi [Testo 2020].

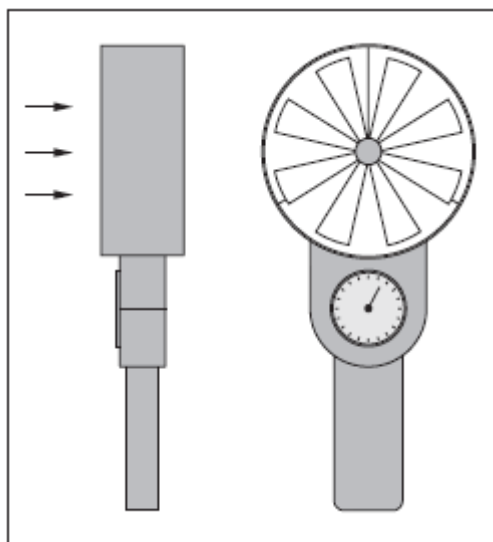
Kuvassa 11 paineenmittaussondilla mitataan venttiin paikallinen paine tulo- tai poistoil-
maventtiilistä. Tämän jälkeen määritetään mittauspaineen avulla tilavuusvirta venttiin
valmistajan käyrästä.



Kuva 11. Paine-eron mittaussondi [16. s. 10].

7.2.2 Siipipyöranemometri

Siipipyöranemometrissä on laakeroitu siipipyörä, joka pyörii ilmvirran vaikutuksesta
kuvan 12 mukaisesti. Siipipyörä liikkuu sitä nopeammin, mitä voimakkaampi virtaus on.
Virtausnopeus on lähes verrannollinen pyörimisnopeuteen.



Kuva 12. Siipipyöranemometri [16, s. 10].

7.2.3 Balometri

Kuvassa 13 on balometri, jonka suppilon muotoinen huppu ohjaa ilman mittausosaan. Mittausosassa on kiinteästi sijoitettuja antureita. Antureita on useassa pisteessä, ja ne ovat sijoitettuna virtauspoikkipinnan alueelle. Mittalaitteena on termistorianemometri, joka soveltuu hyvin paikallisen nopeuden mittaukseen.



Kuva 13. Teston balometri [Testo 2020].

8 Tallentavat, etäluettavat mittalaitteet rakennusten paine-erojen pitkäaikaisseurantaan

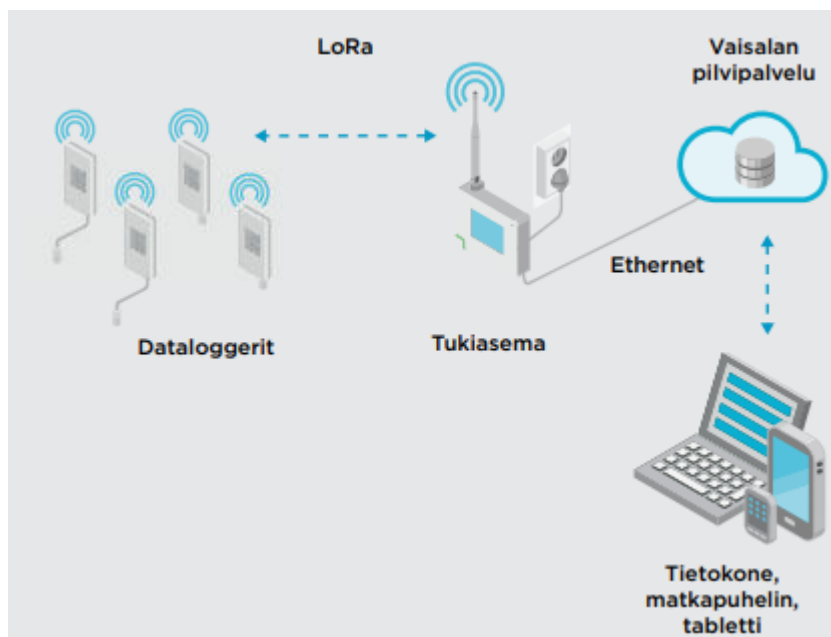
8.1 Olosuhdeseurannan taustat

Taloteknisten järjestelmien toimintaa analysoidaan yleensä hyödyntämällä rakennusten omaa automaatiojärjestelmää. Rakennusten omista automaatiojärjestelmistä ei kuitenkaan yleensä saada riittävästi mittaustietoa painesuhdeongelmien havaitsemiseksi ja syiden selvittämiseksi. Erilliset pitkäaikaisseurantaan kehitetyt järjestelmät tarjoavat mahdollisuuden analysoida ja vertailla erilaisia parametrejä keskenään. Järjestelmistä saatua dataa voidaan hyödyntää tekemällä siitä analyyskejä. Nämä helpottavat johtopäätösten tekemistä ongelmien syistä ja tarvittavista korjaustoimenpiteistä.

Kiinteistöautomaatio on tällä hetkellä murroksessa, kun uudet mittaustekniikat ja pilvipalvelupohjainen tiedonkeruu avaavat uusia mahdollisuuksia. Anturitekniikka on kehittynyt voimakkaasti johtuen mm. mittaasanturien laajasta käytöstä kuluttajatuotteissa. Edullisia ja luotettavia antureita on saatavilla, mutta mittalaitteiden kehitys on edennyt anturitekniikkaa hitaammin. IoT-tekniikka (Internet of Things) mullistaa jatkossa tiedonkeruun ja ohjauksen, kun yksittäiset anturit voivat sijainnista riippumatta tuottaa reaaliaikaisia tuloksia suoraan pilvipalvelun tietokantaan. Kehittyneen mittaustekniikan ansioista rakennuksen painesuhteita voidaan nykyään seurata vaivattomasti etänä langattoman tekniikan avulla.

8.2 Etäluettavat järjestelmät

Etäluettava järjestelmä tarjoaa mahdollisuuden mittaustulosten lukemiseen missä ja milloin vain. Järjestelmät mahdollistavat kustannustehokkaan ja tarkan tavan seurata rakennusten painesuhteita. On olemassa erityyppisiä etäluettavia järjestelmiä, kuten täysin langattomia, johdollisia sekä hybridiversioita, joissa osa laitteista toimii verkkovirralla ja osa akkuvirralla. Etäluettavat järjestelmät koostuvat usein keskusyksiköstä ja siihen on mahdollista kytkeä langattomasti lähettimiä kuvan 14 mukaisesti. Lisäksi järjestelmiin on saatavilla signaalinvahvistimia, jolloin saadaan vahvistettua langattoman tiedonsiirron toimintaa ja kantosädettä laitteiden välillä. Langattomissa järjestelmissä korostuu toimintaperiaatteen helppous. Mitattu tieto siirretään eteenpäin täysin langattomasti, eikä verkkovirtaa tarvita kaikille lähettimille. [21.]



Kuva 14. Esimerkki Vaisalan langattomasta tiedonsiirrosta [Vaisala Oy 2020].

Pitkäaikaisseurantaan tarkoitetut järjestelmät on tarkoitettu pidempiaikaiseen painesuhteiden tarkasteluun rakennuksissa. Mittaustuloksia voidaan tallentaa pilvipalveluun tai laitteen muistiin. Molemmat tallennustavat yleensä kuitenkin mahdollistavat mittaustuloksien tarkastelun mittauksien aikana tietokoneelta. [21.] Tiedonsiirto tapahtuu laitteistosta riippuen esimerkiksi WIFI- tai GSM-yhteyden avulla pilvipalveluun tarkastelua varten.

9 Paine-erojen mittaus rakennuksessa

Jatkossa sisäilmaston ja rakennuksen painesuhteiden hallinta on muodostumassa aiempaa haastavammaksi. Nykyrakentamisessa pyritään energiansäästöyistä tiiviisiin rakenteisiin ja hyvään lämmöneristävyyteen. Tiivis rakenne aiheuttaa haasteita painesuhteiden hallinnalle, koska pienetkin ilmavirtojen muutokset aiheuttavat merkittäviä painevaihteluja. Ilmativiissä rakennuksessa painesuhteiden hallintaa vaikeuttaa kylmänä vuodenaikana ulko- ja sisäilman tiheyserosta johtuva paine-ero. Rakennusten alimmat kerrokset ovat voimakkaasti alipaineisia ja vastaavasti ylimmät kerrokset ylipaineisia. Tämä aiheuttaa ongelmia myös matalissa 15 metriä tai alle korkeissa kerrostaloissa, mutta ongelmat ja niiden hallinta korostuvat yli 15 metriä korkeissa rakennuksissa. Samoin ulko-vaipan eristepaksuuden kasvattaminen tekee kosteuden pääsyn rakenteisiin aiempaa

haitallisemmaksi, koska riski kosteuden tiivistymiseen rakenteisiin on suurempi. [18, s. 11–12.]

Siirryttäessä nZEB-rakennuksiin (Nearly Zero Energy Buildings) painesuhteiden hallinnan tulisi olla varmennettu. nZEB-rakennuksissa tullaan käyttämään entistä enemmän muun muassa tarpeenmukaista ilmanvaihtoa, jossa ilmavirrat säätyvät tilojen käytön ja kuormien mukaan. Myös tämä aiheuttaa haasteita rakennuksen painesuhteiden hallinnalle. Ilmanvaihtojärjestelmässä saattaa olla useita peräkkäin toimivia säätimiä, joiden keskinäinen yhteistoiminta näkyy käytännössä painesuhteiden vaihteluna.

Sisäilman laatua pyritään enenevässä määrin hallitsemaan tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla jossa ilmavirrat säätyvät tilojen käytön, kuormituksen ja sisäilman laadun mukaan. Sen toimivuus riippuu mittausturien luotettavuudesta ja likaantuvuudesta sekä ilmastoinnin säädön toimivuudesta. Huonosti toimiva järjestelmä voi aiheuttaa sisäilman laadun puutteita ja toisaalta vaihteluja rakennuksen painesuhteissa. Ilmavirtasäätimien käyttö on viime vuosina lisääntynyt myös asuinkiinteistöissä. Ilmavirtasäätimien avulla pyritään tyyppillisesti kompensoimaan liesikupujen tehostusilmavirran tarvitsema korvausilma.

Ilmanvaihtojärjestelmän toimintaedellytyksien varmistamisessa on ilmavirtojen lisäksi tärkeää tarkistaa tilojen painesuhteet. Virheelliset painesuhteet ovat yksi merkittävimmistä rakennusten sisäilmaongelmia aiheuttavista tekijöistä. Ylipaineisessa rakennuksessa sisäilman kosteus kulkeutuu vuotojen kautta rakenteisiin, jossa se kylmänä vuodenaikana voi tiivistyä ja aiheuttaa kosteusvaurioita. Tämän vuoksi rakennukset pyritään pitämään ulkoilman suhteen tasapainossa. [4, s. 118–122.]

Rakennusten painesuhteiden hallinta edellyttää tarkkoja ja riittävän laajoja mittaustietoja sekä ilmanvaihdon säädön hyvää toimintaa. Näissä molemmissa esiintyy kuitenkin paljon puutteita. Tyyppillisesti ilmanvaihdon säädöissä mitataan ainoastaan ilmavirtoja eikä painesuhteita mitata välttämättä lainkaan. Tämän seurauksena painesuhteet voivat poiketa tavoitelluista arvoista, vaikka ilmavirrat olisivatkin säädetty. Mittaustiedon vähäisyyden vuoksi rakennusten todellisista painesuhteista ei nykyisin useinkaan ole kunnon käsitystä. [18, s. 11–12.]

Määritettäessä ilmanvaihdon rakennukseen muodostavaa sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa tulee huomioida, että tuuli, terminen voima ja käyttäjien toiminta aiheuttavat mittaustulokseen muutosta. Nämä muutokset voidaan tulkita mittausvirheeksi. [18, s. 23–28.]

Paine-eromittaukset ulko- ja sisäilman välillä tehdään noin 1 metrin korkeudelta lattiapinnasta. Mittausletku viedään ulos tuuletusikkunasta tai parvekkeen ovesta, kuvan 15 mukaisella tavalla. Mittaukset suoritetaan siten, että ikkunat ja ovet pidetään suljettuina. [18, s. 23–28.]



Kuva 15. Paine-eromittaus ulko- ja sisäilman välillä.

9.1 Mittalaitteet

Mittalaitteiden tulee olla tarkkuudeltaan sellaisia, että ne soveltuvat pienten paine-erojen tarkasteluun. Paine-erojen mittausalueen tulee olla vähintään -50...+50 Pa, lukematakkisuuden tulee olla enintään 1 Pa, suositeltava olisi 0,1 Pa sekä mittausrvirheen pienillä -10...+10 Pa:n paine-eroilla enintään +/-1 Pa. [18, s. 23–28.]

Mittalaitteeseen liitetään paine-eromittaukseen soveltuva mittaletku, johon liitetään jäykkäseinämäinen putki ilmatiiviisti. Paine-eroa mitattaessa jäykkäseinämäinen putki vietään ulos ikkuna- tai oviaukosta. Huonetilasta toiseen mitattaessa putki vietään joko seinään porattavan reiän tai toisen huonetilan kautta. [18, s. 23–30.]

Mitattaessa ulko- ja sisäilman välistä paine-eroa mittausetku liitetään mittalaitteen miinus- tai referenssi liittimeen. Negatiivinen mittaustulos kertoo tilan olevan alipaineinen ulkoilmaan tai verrattavaan tilaan nähden, positiivinen mittaustulos kertoo tilan olevan ylipaineinen ulkoilmaan tai verrattavaan tilaan nähden. [18, s. 23–28.]

9.2 Paine-erojen hetkellinen mittaus

Hetkellisin paine-eromittauksin voidaan todeta kahden erillisen tilan välinen paine-ero tai jonkin mitattavan tilan ja ulkoilman välinen paine-ero. Hetkellisissä mittauksissa tulee ottaa huomioon, että mittaustulosten perusteella ei voida lähteä olettamaan rakennuksessa yleisesti vallitsevia olosuhteita. [18, s. 23–28.]

Paine-eromittaukset tulisi tehdä niin sanottuna pitkäaikaisseurantaana, jos hetkellisissä mittauksissa havaitaan suurta vaihtelua. Parhaiten hetkelliset paine-eromittaukset soveltuvat rakennuksen sisäisten tilojen välisten paine-erojen tarkasteluun, jolloin tuulen vaikutus on huomattavasti vähäisempi kuin ulko- ja sisäilman välisissä mittauksissa. Hetkellisin mittauksin voidaan havaita tilat, joiden tulo- ja poistoilmavirrat ovat huomattavan epätasapainossa. [18, s. 23–28.]

9.3 Paine-erojen pitkäaikaisseuranta rakennuksessa

Pitkäaikaisseurannan avulla voidaan tarkastella rakennuksen ulko- ja sisäilman tai rakennuksen tilojen välisiä paine-eroja ilmanvaihdon normaaleissa käyttötilanteissa. Pitkäaikaisseurannan mittausjakson tulisi olla vähintään 7–14 vuorokautta ja paine-erojen mitausvälin tulee olla tasan 1 minuutti. Mittauksien tulisi sisältää aina vähintään yksi viikonloppu. Mittauksia tehdessä tulee huomioida, että kaikkien ikkunoiden ja ovien tulee olla suljettuina, jos se vastaa tavanomaista käyttöä. [18, s. 23–28.]

Pitkäaikaisseurannan avulla voidaan havaita ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan tarkoituksenmukaisuus ja ilmanvaihtojärjestelmän toiminta yleensä, mittausjakson keskimääräinen paine-ero rakennuksessa, sääolojen ja rakennuksen käytön yhteisvaikutus painesuhteisiin, säätöautomaation toiminta ja tarkoituksenmukaisuus. [18, s. 29–34.]

Mitattaessa huonetilan ja ulkoilman välistä painesuhdetta pitää varmistaa, ettei mitaletkuun pääse sade- tai kondenssivettä. Letkuihin on saatavilla erillisiä sade- ja tuulisuojia. [18, s. 23–30.]

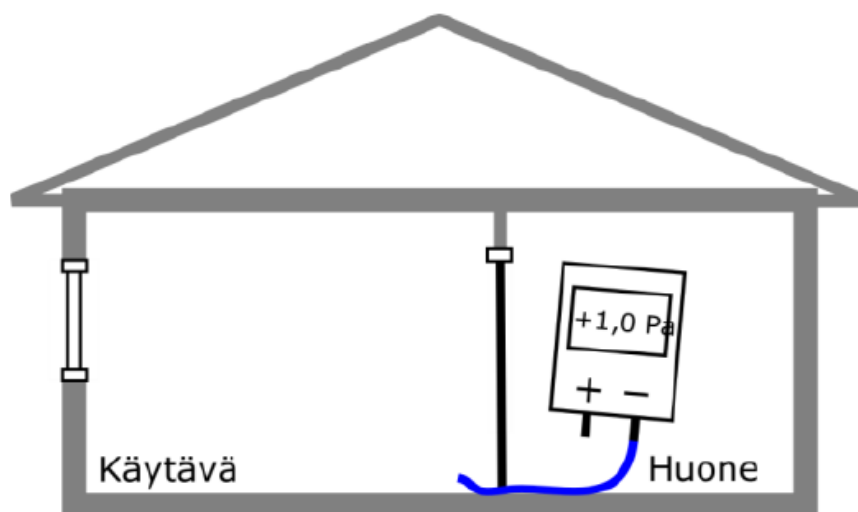
Rakennuksen paine-erojen pitkäaikaisseurannassa pyritään määrittämään keskimääräinen paine-ero ulko- ja sisäilman välillä. Paine-eromittaukset tulisi tehdä yhtäaikaisesti aina kahdelta eri julkisivulta. Mittaukset täytyy suorittaa rakennuksen ylimmästä ja alimmasta kerroksesta yhtä aikaa, jos rakennus käsittää enemmän kuin yhden kerroksen. [18, s. 23–30.]

Rakennukset, jotka ovat vähintään 15 metriä korkeita, määritellään korkeiksi rakennuksiksi. Esimerkiksi 5-kerroksiset asuinrakennukset ovat korkeita rakennuksia. Näissä rakennuksissa on suositeltavaa mitata ulkoilman ja porrashuoneiden välinen paine-ero sekä sisätilojen ja porrashuoneiden välinen paine-ero. Mittaukset tulisi suorittaa vähintään hetkellisin mittauksin. [18, s. 23–30.]

9.3.1 Huonetilojen välisen paine-eron pitkäaikaisseuranta

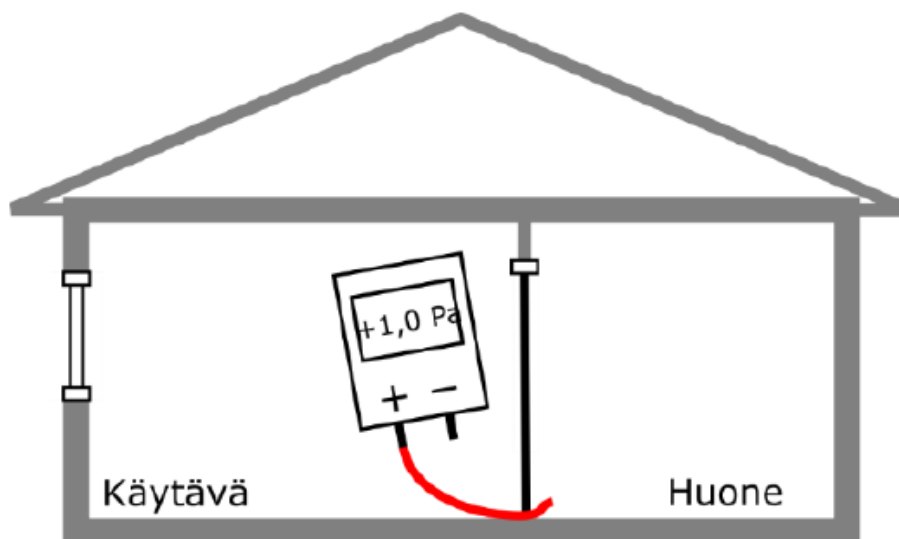
Mitattaessa paine-eroja huonetilojen välillä, johdetaan mittausletku tilojen välillä oven tiivisteraon tai seinään tehdyn reiän kautta. Jos tilojen välillä ei ole suurta lämpötila-eroa, ei mittausletkun läpiviennin korkeusasemaa tarvitse huomioida. [18, s. 23–30.]

Mitattaessa huonetilan ja käytävän välistä paine-eroa tulee ottaa huomioon, mihin liittimeen mittausletku asennetaan mittalaitteessa. Mittalaitteen ollessa huonetilassa liitetään mittausletku miinus- tai referenssiliittimeen kuvan 16 mukaisesti. Näin positiivinen arvo kertoo huoneen olevan ylipaineinen käytävään nähden. [18, s. 23–30.]



Kuva 16. Huonetilan ja käytävän välinen paine-eromittaus [18, s. 30].

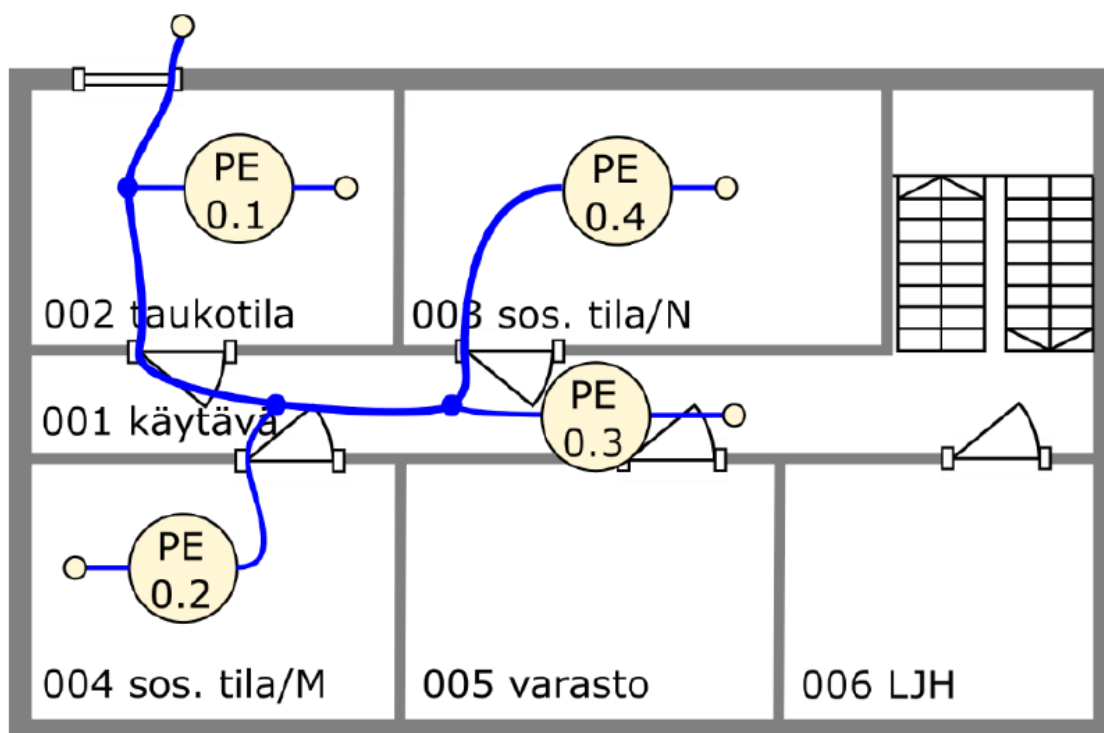
Mittalaitteen ollessa käytävässä liitetään mittausletku miinus- tai referenssiliittimeen kuvan 17 mukaisesti. Näin positiivinen arvo kertoo käytävän olevan ylipaineinen asuntoon nähden.



Kuva 17. Käytävän ja huonetilan välinen paine-eromittaus [18, s. 30].

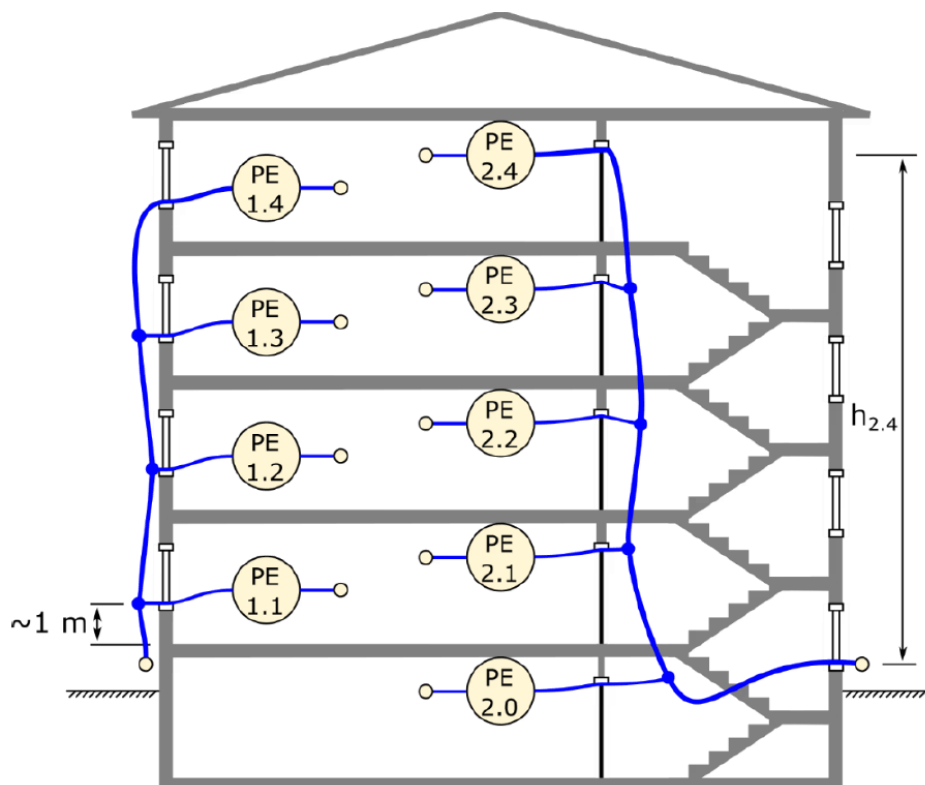
9.3.2 Referenssilinjan paine-erojen pitkäaikaisseuranta

Ulkoilmaan johdettavan referenssilinjamittauksen yhteen paine-ero mittausletkuun liitetään useita paine-eromittareita. Tätä mittaustapaa voidaan hyödyntää, kun halutaan mitata huonetilojen välisiä paine-eroja tai halutaan vähentää tuulen vaikutusta mittaustuloksissa. Mittaustapa soveltuu hyvin myös ikkunattomien kellari- tai muiden tilojen paine-eromittauksiin joista muuten olisi vaikeaa viedä paine-eromittauksia ulos rakennuksesta. Referenssilinjamittauksessa tarvitsee viedä ulos ainoastaan yksi mittaletku. [18, s. 29–34.] Referenssilinjamittauksia voidaan suorittaa niin sanotusti vaak- tai pystylinjaisena mittauksena. Kuvassa 18 on esitetty vaakalinjareferenssimittaus, jossa kaikki paine-eromittarit sijaitsevat samassa tasossa.



Kuva 18. Vaakalinjareferenssimittaus [18, s. 31].

Kuvassa 19 on puolestaan esitetty pystylinjareferenssimittaus, siinä paine-eromittarit ovat asennettuna eri kerroksiin. Pystylinjareferenssimittauksessa paine-eromittareita voi olla samaan tasoon asennettuna enemmän kuin yksi kappale. Pystyreferenssilinja kulkee, joko rakennuksen sisällä tai ulkopuolella. Mitattavien tilojen paine-eromittarit liitetään pystyreferenssilinjaan, joko rakennuksen sisä- tai ulkopuolella. Rakennuksen ulkopuolella sijaitsevan pystysuuntaisen referenssilinjan paine-eroantureiden PE 1.1 – PE 1.4 mittaustuloksiin ei tarvitse tehdä termistä korjausta, koska referenssilinjan ilman lämpötila on sama kuin ulkoilman lämpötila. Jos ulkoseinän mittauspisteet sijaitsevat 1,0 (+/-0,3 m) metrin korkeudella lattiapinnasta, ei paine-eromittausten tuloksia tarvitse korjata. Rakennuksen sisäpuolella porrashuoneessa sijaitsevan pystysuuntaisen referenssilinjan paine-eroantureiden PE 2.0 – PE 2.4 mittaustuloksiin tulee tehdä termisen paineeron kompensointi. Porrashuoneen referenssilinjan lämpötila poikkeaa ulkoilman lämpötilasta. [18, s. 29–34.]



Kuva 19. Pystyreferenssinjamittaus [19, s. 32].

9.3.3 Termisen paine-eron huomiointi mittauksissa

Suoritettaessa rakennuksen paine-erojen pitkäaikaisseurantaa tulee ottaa huomioon lämpötilaerot. Mittauksien aikana lämpötilaero ei aina pysy vakiona ulko- ja sisäilman välillä. Korjaus suoritetaan määrittämällä termisen paine-ero (Pa/m), joka riippuu ulko- ja sisäilman tiheydestä. Ulkoilman lämpötilaksi riittää kohteelta mitattu lämpötila tai lähimmän sääaseman tunnitaiset lämpötilat. Sisälämpötilojen vaihdellessa suuresti, tarvitsee sisäilman lämpötilaa tallentaa paine-eromittausten yhteydessä. Muutoin sisäilman lämpötila voidaan olettaa vakioksi. [18, s. 27–29.]

Paine-erojen korjaus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta p_{\text{korjattu}} = \Delta p_{\text{mitattu}} - \frac{\Delta p}{\Delta h} \cdot (h_1 - h_0) \quad (2)$$

missä,

$\Delta p_{\text{mitattu}}$ = mitattu paine – ero (Pa)

$\Delta p_{\text{korjattu}}$ = laskennallisesti määritetty paine – ero 1,0 m korkeudella lattiasta (pa)

$\frac{\Delta p}{\Delta h}$ = terminen paine – ero $\left(\frac{\text{Pa}}{\text{m}}\right)$

h_0 = paine – eron referenssitason korkeusasema (m)

h_1 = mittauskorkeus "läpiviennin korkeusasema" (m)

[18]

10 Yhteenveto

Ilmanvaihtojärjestelmien mittaus- ja säätötöiden yhteydessä ei useasti kiinnitetä riittävästi huomioita painesuhteiden hallintaan. Ongelmia ei usein havaita ajoissa ja niiden todellisista syistä ei aina päästä selville. Keskeisinä syinä näihin puutteisiin ovat ongelmat talotekniikan toiminnassa sekä puutteelliset toimintatavat ilmapirtamittausten yhteydessä. Ilmapirtamittauksia tehdessä tulee ottaa huomioon mahdolliset mittausvirheitä aiheuttavat tekijät. Eri mittausmenetelmien välillä syntyy eroja, joilla voi olla suuri vaikutus rakennuksen painesuhteisiin sekä ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuteen ja toimintaan.

Ongelmat rakennusten painesuhteiden hallinnassa voivat aiheuttaa kosteuden tiivistymistä rakenteisiin ja siitä aiheutuvia rakenneaurioita ja sisäilmaongelmia. Uudet langattomat mittausjärjestelmät tuovat uusia mahdollisuuksia näiden ongelmien ratkaisemiseen. Langattomien järjestelmien avulla pystytään aiempaa huomattavasti helpommin ja kustannustehokkaammin seuraamaan syntyviä olosuhteita rakennusten eri osissa. Näin saadaan kattava käsitys rakennuksen painesuhteista ja talotekniikan toiminnasta eri käyttötilanteissa. Tältä pohjalta on mahdollista luoda uusia toimintamalleja rakennusten painesuhteiden, sisäilman olosuhteiden ja energiankulutuksen hallintaan.

Kohteiden luovutuksessa valvova viranomainen edellyttää, että ilmanvaihdon päätelaitteiden mittaustulokset tulee täsmätä suunnittelijan ilmoittamiin arvoihin. Mittaustuloksille on ilmoitettu tyypillisesti hyväksyttävät poikkeamat suunnitelluista arvoista. Hyväksyttävät poikkeamat suunnitelluista arvoista voivat olla seuraavia:

- ilmavirta järjestelmä- ja huoneistokohtaisesti ± 10 prosenttia
- ilmavirta huonekohtaisesti ± 20 prosenttia, kuitenkin siten, että poikkeama voi aina olla vähintään $1 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Hyväksyttävät poikkeamat sisältävät sekä mittaustuloksen poikkeamat, että mittausepävarmuuden, joka on esitettävä mittaustulosten yhteydessä. Mittausmenetelmän ja mittauslaitteiden on sovelluttava mitattavan ilmavirran mittaukseen. Mittauslaitteiden on oltava kalibroituja, ja kalibroinnin on oltava voimassa ja mittaustulosta on korjattava kalibroinnin mukaan.

Rakennusten painesuhteiden toteutumista ei voida arvioida pelkästään valvovalle viranomaiselle toimitettavan ilmavirtojen mittauspöytäkirjan perusteella. Ei voida olettaa rakennuksen toimivan painesuhteiltaan suunnitellusti, vaikka suunnitellut ilmavirrat olisi saavutettu ja mittaustulokset mahtuisivat hyväksytyin poikkeaman sisään. Ilmavirtojen mittauksen ja säädön onnistumisen arviointi tulisi suorittaa ns. pitkäaikaisseurantana ja vähintään 14 vrk kestävässä mittauksena. Pitkäaikaisseuranta tulisi tehdä mahdollisuuksien mukaan lämmitys- ja jäähdytyskaudella. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat voimakkaasti ulkoiset olosuhteet kuten lämpötila ja tuuli. Näiden vaikutusta ei voida talotekniikalla avulla täysin kumota. Rakennuksen pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan velvollisuus on suunnittelussa ottaa mahdollisuuksien mukaan huomioon se, että ulkoisten tekijöiden vaikutus minimoidaan jo suunnitteluvaiheessa. Suunnittelun lähtökohtana on, että kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa saavutetaan oleskeluvyöhykkeellä turvallinen ja terveellinen sisäilmasto.

Tulevaisuudessa sisäilmaston ja rakennuksen painesuhteiden hallinta on muodostumassa aiempaa haastavammaksi. Nykyrakentamisessa pyritään energiansäästösyistä tiiviisiin rakenteisiin ja hyvään lämmöneristävyyteen. Tiivis rakenne aiheuttaa haasteita painesuhteiden hallinnalle, koska pienetkin ilmavirtojen muutokset aiheuttavat merkittäviä painevaihteluja.

Korkeat rakennukset ovat yleistymässä myös Suomessa. Niissä painesuhteiden hallintaa vaikeuttaa kylmänä vuodenaikana ulko- ja sisäilman tiheuserosta johtuva paine-ero.

Rakennusten alimmat kerrokset ovat voimakkaasti alipaineisia ja vastaavasti ylimmät kerrokset ylipaineisia. Tämä aiheuttaa ongelmia myös matalissa enintään 15 metriä korkeissa kerrostaloissa, mutta ongelmat ja niiden hallinta korostuvat yli 15 metriä korkeissa rakennuksissa.

Rakennuksissa tullaan käyttämään entistä enemmän tarpeenmukaista ilmanvaihtoa, jossa ilmavirrat säätyvät tilojen käytön ja kuormien mukaan. Tämä aiheuttaa haasteita rakennuksen painesuhteiden hallinnalle. Ilmanvaihtojärjestelmässä saattaa olla useita peräkkäin toimivia säätimiä, joiden keskinäinen yhteistoiminta näkyy käytännössä painesuhteiden vaihteluna rakennuksen eri osissa.

Sisäilmastolla on suuri merkitys ihmisten hyvinvoinnille ja viihtyvyydelle. Yhä tärkeämpi osa yhteiskunnallista keskustelua on ympäristökuormitus saasteiden ja energiankulutuksen muodossa. Ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuusvaatimukset tulevat tiukentumaan jatkossakin. Tästä syystä ympäristöystävällisille, tehokkaille ja luotettavasti toimiville ilmanvaihtojärjestelmille on tarvetta tulevaisuudessa.

Lähteet

- 1 Siikanen, Unto. 2014. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovelluksia. Helsinki. Rakennustieto.
- 2 Liddament, Martin W. 1986. Air Infiltration Calculation Techniques - an Applications Guide. The Air Infiltration and Ventilation Centre.
- 3 Suomen Tuuliatlas. 2009. Verkkoaineisto. <<http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>>. Luettu 23.1.2021.
- 4 Pitkäranta, Miia. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- 5 Ilmavirtaukset rakennuksessa. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekniikan-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>>. Luettu 23.1.2021
- 6 Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto 14.3.2019. Verkkoaineisto. Kuntien sisäilmaverkosto. Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa. <<https://www.lyyti.fi/att/539c84Ac34bE95/74c3761761F31e5Fb55F66331b48bBE0Dda06dA12A3c0Eb03945311a3c1fd>>. Luettu 23.1.2021.
- 7 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. 1009/2017. Ympäristöministeriö.
- 8 Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/8-ss-ilmanvaihto>>. Luettu 17.10.2020.
- 9 Vinha, Juha. 2015. Rakennusten kosteudenhallinnan kymmenen riskikohdan arviointi ja energiatehokkaan rakentamisen lisähaasteet. Verkkoaineisto. <http://kuivaketju10.fi/wp/wp-content/uploads/2015/11/Rakennusten-kosteuden-hallinnan-kymmenen-riskikohdan-arviointi-ja-energiatehokkaan-rakentamisen-lis%C3%A4haasteet_Juha-Vinha.pdf>. Luettu 17.10.2020.
- 10 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriö.

- 11 Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. 2016. Verkkoaineisto. Valvira. <<https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje/ac8d5e16-97be-456c-9c9c-ce8560f2092e>>. Luettu 17.10.2020
- 12 Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas. 2020. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/20-ss-ilmavirtojen-tasapaino-ja-rakenteiden-ilmanpityvyysahdetieto>>. Luettu 12.9.2020.
- 13 Perustietoa sisäilmasta, ilmanvaihdon perusteet. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Ilmanvaihdon-perusteet>>. Luettu 17.10.2020.
- 14 Sandberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Helsinki. Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 15 Ilmanvaihdon asiantuntijoilta. Verkkoaineisto. Energent Oy. <<https://www.energent.fi/ilmanvaihdon-asiantuntijoilta/ekosuunnitteludirektiivi-tiukentaa-vaatimuksia-1-1-2018/>>. Luettu 13.11.2020
- 16 Hyvä tietää lämmönsiirtimistä. Verkkoaineisto. Swegon Oy. <<https://www.swegon.com/fi/oppaat/erilaiset-lammonsiirrintyytit/>>. Luettu 24.1.2021
- 17 Ilmanvaihtojärjestelmät. Verkkoaineisto. Hengitysliitto ry. <<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat>>. Luettu 17.10.2020
- 18 Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraportti 14.10.2019. 2019. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/esimerkit/rakennusten-paine-erojen-mittausohje>>. Luettu 12.2.2021
- 19 LVI-laitosten mittaukset. 1999. LVI 014-10290. Rakennustieto Oy. Rakennustietosäätiö ja LVI-keskusliitto.
- 20 SFS-EN 12599. Rakennusten ilmanvaihto, ilmastointi- ja ilmanvaihtojärjestelmien luovutukseen liittyvät testimenettelyt ja mittausmenetelmät. 2013. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 21 Vaisala viewLinc. 2018. Verkkoaineisto. Vaisala Oy. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-VaiNet-AppNote_B211523F1%20%28Low%29.pdf>. Luettu 21.2.2021.