

Rakennusten paine-erojen mittausohje- projektin loppuraportti

14.10.2019

Rakennusten paine-erojen mittausohje- projektin loppuraportti

SISÄLLYSLUETTELO

Esipuhe	3
Määritelmät.....	5
1 Tausta.....	11
2 Paine-eron mittausohjeen sisältö.....	12
3 Aiemmin käytössä olleet ohjeet ja yleiset suunnitteluratkaisut.....	13
3.1 Asuinpientalot	14
3.2 Asuinkerrostalot	16
3.2.1 Koneellinen poistoilmanvaihto	16
3.2.2 Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	17
3.3 Vakioilmavirtajärjestelmät.....	19
3.3.1 Toimistorakennukset	19
3.3.2 Muut vakioilmavirtajärjestelmillä varustetut rakennukset	20
3.3.3 Yksittäisten huonetilojen ilmanvaihdon epätasapaino.....	20
3.4 Muuttuvailmavirtaiset järjestelmät.....	21
3.4.1 Tasapainoiksi suunnitellut järjestelmät	21
3.4.2 Kohdepoistojärjestelmät vailla korvausilmaa	22
3.4.3 Korvausilmaa tuottavat ratkaisut	22
3.4.3.1 Tehostuspeltijärjestelmä	22
3.4.3.2 Ilmavirtasäätöinen järjestelmä.....	22
4 Paine-eron mittaaminen.....	23
4.1 Hetkellinen mittaus	23
4.1.1 Käyttötarkoitus	23
4.1.2 Vaatimukset mittalaitteille	23
4.1.3 Mittauksen suoritus	24
4.1.3.1 Yksittäisen huonetilan ja ulkoilman välisen paine-eron suora mittaus	24
4.1.3.2 Kahden huonetilan välisen paine-eron mittaus	25
4.1.3.3 Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron epäsuora mittaus	25
4.1.3.4 Koko rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaus.....	26
4.2 Termisen paine-eron kompensointi.....	27
4.3 Seurantamittaus.....	29
4.3.1 Käyttötarkoitus	29
4.3.2 Vaatimukset mittalaitteille	29
4.3.3 Mittauksen suoritus	29
4.3.3.1 Yksittäisen huonetilan ja ulkoilman välisen paine-eron suora mittaus	29
4.3.3.2 Kahden huonetilan välisen paine-eron mittaus	30
4.3.3.3 Referenssilinjaan perustuva mittaus.....	30
4.3.3.4 Koko rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaus.....	32
4.3.3.5 Mittaus ilmanvaihdon päätelaitteista tai ilmavirran mittaussyhteistä.....	33
4.4 Jatkuva mittaus	33
5 Lähteet.....	35

Liite 1 Sään vaikutus

Liite 2 Ilmanvaihdon säätöjärjestelmien ja rakennuksen käytön vaikutus

Liite 3 Paine-eron tavoitetaso

Esipuhe

Rakennusten paine-erojen mittausohje keskittyy ensisijaisesti rakennuksen koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän aikaansaaman paine-eron mittaamiseen. Mittauksen avulla voidaan määrittää, millainen ylitai alipaine rakennuksen ulkovaipparakenteisiin kohdistuu. Mittauksen avulla voidaan myös arvioida ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa – tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapainon suuruutta sekä järjestelmän toiminnasta johtuvia hetkellisen paine-eron vaihteluita.

Tämän ohjeen mukaisia mittauksia voidaan käyttää apuna ilmanvaihtojärjestelmiä tasapainotettaessa. Ilmavirtoja ei milloinkaan saa säätää pelkästään paine-eromittauksiin perustuen. Ilmanvaihtojärjestelmään tehtävät muutokset vaativat aina suunnittelijan ja säätötyön asiantuntijan yhteistyötä.

Rakennusten sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaukselle ei ennen ole ollut selkeää ohjeistusta, jossa on huomioitu myös ilmanvaihtojärjestelmän ja sään vaikutus. Ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan varmistamisesta löytyy tietoa ilmanvaihdon kuntotutkimusohjeista (SuLVIn IV-kuntotutkimus).

Aikaisemmin rakennusten sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa ei ole mitattu systemaattisesti. Mittauksia on useimmiten suoritettu vasta sisäilmaongelmia selvittäessä. Mittauksen toteutustapa on vakiintunut – mittaus suoritetaan yleensä tuuletusikkunan alareunasta. Mittauksen suunnittelussa ja tulosten tulkinnassa ei aina ole osattu huomioida sään ja ilmanvaihdon toiminnan vaikutusta tuloksiin, mikä voi johtaa virhepäätelmiin.

Ohje täsmentää paine-eron mittauksen suorittamista sekä antaa ohjeita tulosten tulkintaan. Mittaustulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi paine-eromittauksen referenssisitasoksi määritetään 1,0 m lattian pinnasta ylöspäin. Kun mittaus suoritetaan tästä poikkeavalta korkeudelta, mittaustulosta korjataan laskennallisesti vastaamaan paine-eroa referenssisitasolla. Samalla laskentamenetelyllä voidaan tarvittaessa myös määrittää sisä- ja ulkoilma välinen paine-ero esimerkiksi korkeiden huonetilojen ja rakennusten yläosassa.

Sääoloista ja rakennuksen käyttäjien toiminnasta johtuva vaihtelu tulkitaan häiriöksi, joka pyritään suodattamaan mittaustuloksista pois.

Ohjeen mukaisia paine-eromittauksia voidaan toteuttaa mm.

- tiiviiden rakennusten ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtojen säädön yhteydessä
- määritettäessä tarvetta ilmanvaihtojärjestelmän uudelleensäädölle tai säätöautomaation parantamiselle paine-erojen vaihtelun vähentämiseksi
- sisäilmakorjausten yhteydessä – lähtötilanteen mittaus tutkimusten tai korjaussuunnittelun aikana, laadunvarmistus korjausten jälkeen

Tässä ohjeessa ei anneta paine-erojen tavoitearvoja eikä ohjeita ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluun ja säätöön paine-eron saattamiseksi tavoitearvoonsa. Nämä määritetään myöhemmin julkistettavassa paine-eron hallintaohjeessa. Mittausohjeen avulla on silti mahdollista arvioida, onko ilmanvaihtojärjestelmän toiminnassa tai säädössä korjausta vaativia ongelmia.

Ohjeen tavoitteena on yhtenäistää paine-eron mittausmenetelmät niin, että tulokset ovat vertailukelpoisia. Ohjeella pyritään myös kiinnittämään huomiota myös siihen, että paine-erojen muodostumiseen vaikuttaa ilmanvaihtojärjestelmän ohella muutkin tekijät:

- ilmanvaihtojärjestelmä ja mitoitusilmavirtojen suuruus

- ilmavirtojen säätötarkkuus ja -poikkeamat
- ilmanvaihtojärjestelmän säätöautomaatio
- rakennuksen ulkovaipan tiiviys ja vuotoilmavirran suuruus (tulo- ja poistoilmavirtojen erotus)
- sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero ja tuuli
- rakennuksen korkeus ja sijainti (mm. alttius tuulelle)
- rakennuksen sisäiset ilmapuoretit
- laiteviat ja palopeltien sulkeutuminen

Ohjeen alussa kuvataan lyhyesti yleisimmät ilmanvaihtojärjestelmät sekä niiden aikaansaama paine-ero. Mittaustulosten tulkinnan vuoksi on tarpeen tunnistaa, millainen ilmanvaihtojärjestelmä mitattavassa rakennuksessa on.

Mittausohjeistus kattaa sekä hetkelliset mittaukset että pitkäkestoiset mittaukset. Tässä osassa annetaan myös ohjeistus sisä- ja ulkoilman välisen *termisen paine-eron* huomiointiin. Ohjeen liitteessä on esimerkkejä mittaustulosten tulkinnasta.

Kiitämme työhön liittyvistä kommentteista professori Juha Vinhaa ja professori Risto Kososta.

Rakennusten paine erojen mittausohje –loppuraportti on tehty ympäristöministeriön toimeksiannosta. Raportissa esitetyt mielipiteet ja ehdotukset ovat raportin tekijöiden, eivätkä edusta ympäristöministeriön kantaa.

Tekijät

Marko Björkroth

Lari Eskola

Määritelmät

Ilmanvaihtojärjestelmät

Ilmanvaihto	Sisäilman laadun ylläpitämistä ja parantamista huoneen ilmaa vaihtamalla. Yleensä käytetään sekoitusilmanvaihtoa, jossa ilmanvaihdolla laimennetaan huoneilmassa olevia epäpuhtauspitoisuuksia.
Painovoimainen ilmanvaihto	Ilmanvaihtoratkaisu, jossa poistoilma virtaa sitä varten rakennettuja hormoneja pitkin tiheyserojen tai tuulen aiheuttamien paine-erojen vaikutuksesta. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa ei käytetä puhaltimia.
Koneellinen ilmanvaihto	Puhaltimen tai muun mekaanisen laitteen avulla aikaansaatua ilmanvaihto.
Koneellinen poisto (-ilmanvaihto)	Koneellinen ilmanvaihto, joka vain poistaa ilmaa rakennuksesta tai huonetilasta.
Yhteiskanavapoisto	Useiden asuinhuoneistojen poistoilma johdetaan samaan kanavaan. Asuinkerrostaloissa yleinen ratkaisu.
Koneellinen tulo ja poisto	Ilmanvaihtojärjestelmä, jossa on koneellinen tulo- ja poistoilma.
Huoneistokohtainen ilmanvaihto	Kerros- ja rivitaloissa käytettävä ilmanvaihtoratkaisu, jossa jokaisella asuinhuoneistolla on oma ilmanvaihtokoneensa, joka yleisimmin sijoitetaan pesuhuoneeseen.
Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä	Ilmanvaihtojärjestelmä, jossa koko rakennuksen ilmanvaihto on toteutettu yhdellä tai muutamalla ilmanvaihtokoneella. Asuinrakennusten tapauksessa keskitetty järjestelmä tarkoittaa, että yksi ilmanvaihtokone palvelee useaa asuinhuoneistoa.
Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä	Ilmanvaihtojärjestelmä, jossa yksittäinen ilmanvaihtokone palvelee vain pientä osaa rakennuksesta.
Ilmastointi	Ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 määritelmä: Sisäilman puhtauden, lämpötilan, kosteuden ja ilman liikkeen hallintaa tulo- tai kierrätysilmaa käsittelemällä. Yleensä ilmastointijärjestelmiksi kutsutaan koneellisia tulo- ja poistojärjestelmiä, joissa tuloilma on koneellisesti jäähdytettyä. Ilmastointi voidaan määritellä myös seuraavasti: Huoneen olosuhteita, lämpötilaa tai ilman kosteutta, pidetään ennalta määrättyjen rajojen sisällä koneellisella ilmanvaihtojärjestelmällä, jossa on tarvittava ilmankäsittely (lämmitys, jäähdytys, kostutus tai kuivaus). Ilmastointijärjestelmissä ilmavirrat mitoitetaan yleensä ilmastointiprosessin vaatimusten (esimerkiksi huoneen lämpö- ja kosteuskuormat) eikä henkilömäärän mukaan, mikä johtaa suurempiin mitoitusilmavirtoihin kuin esisijaisesti henkilömääriin pe-

	rustuvat mitoitusohjeet (rakentamismääräyskokoelman osa D2 vanhojen rakennusten tapauksessa ja Ympäristöministeriön asetukseen 1009/2017 liittyvät suunnitteluohjeet).
Yleisilmanvaihto, yleispoisto	Ilmanvaihto tavanomaisissa asuin-, toimisto- ym. tiloissa, joissa ihmiset ovat tärkein epäpuhtauslähde. Poistoilmaa voidaan johtaa muihin tiloihin (siirtoilmana tai palautusilmana).
Erillispoisto, erillisilmanvaihto	Erillispoiston tai -ilmanvaihdon on tarkoitus poistaa tietyssä päästölähteessä syntyvät ilman epäpuhtaudet. Esimerkkejä tyypillisistä erillispoistoratkaisuista: - liesituuletin, liesikupu - WC- ja siivoustilojen koneellinen poistoilmanvaihto (ns. WC-poistot), joka on toteutettu yleensä huippumureilla ja suunniteltu toimimaan jatkuvasti, myös yöaikaan, jolloin muiden tilojen yleisilmanvaihto (koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto) sammutaan - erilaiset kohdepoistojärjestelmät, esimerkiksi vetokaapit, purunpoistojärjestelmät, pakokaasupoistot Erillispoistojärjestelmille on tyypillistä, ettei niissä ole lämmöntalteenottoa ja käyntiajat poikkeavat yleisilmanvaihdon käyntiajoista (käy jatkuvasti ... käytetään vain tarpeen mukaan, tehostukseen). 2000 -luvulla on yleistynyt ratkaisu, jossa WC ja sosiaalitilojen ilmanvaihto toteutetaan erillispoistojen (ns. WC-poistot) sijaan lämmöntalteenotolla varustetuilla tulo- ja poistoilmakoneilla, joiden tuloilma johdetaan aula- ja käytävätiloihin.
Ilmavirrat	
Tuloilma	Huoneeseen johdettavaa ilmaa (erit. koneellisissa tulo- ja poistojärjestelmissä)
Korvausilma	Koneellisen tai painovoimaisen poiston poistaman ilman tilalle alipaineen vaikutuksesta virtaavaa ilmaa.
Siirtoilma	Tilasta toiseen johdettavaa ilmaa.
Poistoilma	Tilasta poistettavaa ilmaa.
Vuotoilma	Rakennukseen sen seinien, ikkunoiden ja muiden ulkovaipan rakojen kautta virtaava ulkoilma.
Kiertoilma, palautusilma	Tuloilman joukkoon palautettavaa poistoilmaa. Tätä nimitystä käytetään, kun ao. ilmanvaihtokoneeseen on liitetty useita huonetiloja, joiden ilma sekoittuu tätä kautta. Kun vain yksittäisen huonetilan ilmaa kierrätetään ilmanvaihtokoneen tai muun ilmankäsittelylaitteen (esim. ilmalämpöpumppu, puhallinkonvektori, oviverhokoje) kautta, käytetään nimitystä kierrätysilma.
Ulospuhallusilma, jäteilma	Rakennuksesta ulos poistettavaa poistoilmaa. Aiemmin on käytetty nimitystä jäteilma, jolla on ulospuhallusilman ohella viitattu myös

	poistoilmapuhaltimelta tai lämmöntalteenottolaitteelta ulkoilmaan johtavaan kanavistoon (jäteilmakanava).
Mitoitusilmavirta	Tilan tai rakennuksen ilmanvaihtosuunnitelmissa määritetty tulo- tai poistoilmavirta. Mitoitusilmavirta voi olla tilan tai rakennuksen kokonaisilmavirta (yksikkönä l/s tai m ³ /s) tai se voidaan ilmoittaa lattiapinta-alaan suhteutettuna (l/(s·m ²)).
Tehostus	Tilan ilmanvaihdon kasvattaminen tilapäisesti mitoitusilmavirtaa suuremmaksi. Huom. koneellisella poistoilmanvaihdolla varustettujen asuinkerrostalojen tapauksessa ”tehostus” tarkoittaa mitoitusilmavirtaa ja ”normaali teho” puolitettua ilmavirtaa.
Puolitus	Ennen 2000 -lukua rakennetuissa ilmanvaihtojärjestelmissä on tyypillisesti käytetty 2-nopeuksisia puhaltimia, joiden pienemmällä kierrosluvulla ilmavirrat ovat 50 % mitoitusilmavirtoja pienemmät. Tätä ns. puolitusta käytetään, kun ilmanvaihdon tarve on vähäinen tai ulkoilma poikkeuksellisen kylmää, ks. pakkaspuolitus.
Pakkaspuolitus	Vanhoissa ilmanvaihtojärjestelmissä yleinen toiminto, joka pakottaa ilmavaihtokoneet ½-teholle, kun ulkoilman lämpötila laskee alle pakkaspuolitusrajan. Raja-arvo on useimmiten 15 °C paikkakunnan mitoitussulkolämpötilaa korkeampi. (maan eteläosissa -26 °C +15 °C = -11 °C)
Osatehoinen ilmanvaihto	Rakennuksen käyttöaikojen ulkopuolella ilmanvaihdon tarve on vähäinen. Jos ilmanvaihto halutaan pitää jatkuvasti käynnissä, se säädetään yleensä toimimaan mahdollisimman pienellä ilmavirralla. Tyypillisiä ratkaisuja osatehon toteutukseen ovat: - vain WC-poistot käynnissä - ilmanvaihdon puolitus (vanhat iv-koneet, joissa on 2-nopeuksiset puhaltimet) - kierrosnopeussäätöisillä puhaltimilla varustetut iv-koneet toimivat 30–50 % ilmavirralla
Jaksottainen käyttö	Asuin- ja varistorakennuksia lukuun ottamatta tulo- ja poistoilmakoneiden ilmavirrat ylittävät tyhjän rakennuksen ilmanvaihdon tarpeen (suositus 0,15 dm ³ /(s·m ²) silloinkin, kun koneet on säädetty toimimaan minimi-ilmavirrallaan (30-50 % mitoitusilmavirrasta), mikä aiheuttaa energiahukkaa. Jaksottaisessa käytössä ilmanvaihto pysäytetään käyttöaikojen ulkopuolella ja käynnistetään jaksottaisesti niin, että vuorokauden keskimääräinen ilmanvaihtuvuus on ohjearvon mukainen.
Ilmanvaihtolaitteet	
Tuloilmalaite	Koneellisen ilmanvaihdon ns. pääte-elin, jonka kautta tuloilma johdetaan huoneeseen. Puhekielessä käytetään yleisesti myös nimitystä tuloilmaventtiili.

Korvausilmalaite	Ulkoseinälle asennettu laite, jonka kautta sisälle saadaan korvausilmaa.
Korvausilmalämmitin	Korvausilmalaite, jossa korvausilmaa lämmitetään (yleensä sähkölämmittimellä).
Karmi (rako)venttiili	Karmi- ja karmirakoventtiilit ovat ikkunan karmeihin integroitavia korvausilmalaitteita.
Tuloilmaikkuna	Tuloilmaikkuna on nimestään huolimatta korvausilmalaite. Tuloilmaikkunoihin sisältyy korvausilman suodatus ja ilman esilämmitys kierrättämällä sitä lasien välissä.
Poistoilmalaite	Pääte-elin (erit. koneellisissa ilmanvaihtojärjestelmissä), jonka kautta poistetaan ilmaa huoneesta.
Poistoilmaventtiili	Pyöreistä poistoilmalaitteista yleisesti käytetty nimitys.
Kohdepoistolaite	Epäpuhtauslähteen lähelle sijoitettava poistoilmalaite, jolla epäpuhtaudet pyritään sieppaamaan niin, etteivät ne pääse leviämään huoneilmaan.
Liesituuletin	Liesituulettimia on kahta tyyppiä. Liesituuletin ilman lisämääreitä on kohdepoistolaite, jossa on sisäänrakennettu poistopuhallin ja jonka poistoilma johdetaan ulos rakennuksesta. Käytössä ollessaan tällainen liesituuletin tarvitsee korvausilmaa. Aktiivihiihisiuodattimella varustetussa liesituulettimessa on sisäänrakennettu puhallin ja ilmansuodatus (rasvasuodatin ja hajuja poistava aktiivihiihisiuodatin). Tällainen liesituuletin palauttaa suodatetun ilman sisälle, joten se ei tarvitse poistoilmakanavaa eikä korvausilmaa. Aktiivihiihisiuodattimella varustettu liesituuletin ei itsessään ole ilmanvaihtolaite, joten sen lisäksi keittiössä pitää olla myös koneellinen tai painovoimainen poisto (yleispoisto).
Liesikupu	Erityisesti asuinhuoneistojen keittiöissä käytettävä kohdepoistolaite, jossa ei ole sisäänrakennettua poistoilmapuhallinta. Liesikuvuista voidaan käyttää myös seuraavia nimityksiä: Kerrostalokupu on liesikupu, jossa ei ole puhaltimen ohjauskytkimiä. Tätä tyyppiä käytetään mm. kerrostalojen yhteiskanavapoistojärjestelmissä. Säädinkupu on liesikupu, jossa on ohjauskytkin (huoneistokohtaisen) ilmanvaihtokoneen tai poistopuhaltimen ohjaamiseksi. Tehostussäätöisessä liesikuvussa on tehostuspelti, jonka avautuessa poistoilmavirta kasvaa. Ratkaisua käytetään mm. koneellisella yhteiskanavapoistolla sekä keskitetyllä tulo- ja poistoilmanvaihdoilla varustetuissa asuinkerrostaloissa.
Talotuuletin	Liesikuvun ja koko huoneiston (ml. pesu- ja WC-tilat) koneellista poistoilmanvaihtoa palvelevan poistoilmapuhaltimen yhdistelmä. Ratkaisua käytetään pääasiassa rivitaloissa.

Huippumuri	Tätä nimitystä käytetään vesikatolle sijoitettavista poistoilmapuhaltimista.
Huuva	Tätä nimitystä käytetään lämpöä tuottavien epäpuhtauslähteiden yläpuolelle asennettavista suurikokoisista kohdepoistolaitteista, esimerkiksi: - ammattikeittiöiden poistoilmahuuvut - puuliesien yläpuolelle asennettava huuvut (pientalot) - ahjon huuva - teollisuuden kohdepoistolaitteet
Siirtoilmalaite	Siirtoilmalaitteen kautta johdetaan siirtoilmaa huonetilasta toiseen. Siirtoilmalaitteita ovat - ovirako, väh. 15 mm korkuinen virtausaukko oven alareunan ja lattian tai kynnyksen välissä - siirtoilmasäleikkö (asennetaan yleensä oveen) - ääntä vaimentavat siirtoilmalaitteet (asennetaan yleensä väliseiniin, äänenvaimennus ehkäisee äänen siirtymistä huonetilasta toiseen)
Paine-erot ja ilmatiiviys	
Ulkovaippa	Rakennuksen vaippaan tai ulkovaippaan sisältyvät ne rakennusosat, jotka erottavat lämpimät ja puolilämpimät sekä jäähdytetyt kylmätilat ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta. Ulkovaippaan eivät sisälly rakennuksen sisäiset eri tiloja toisistaan erottavat rakennusosat (välipohjat ja -seinät).
Ilmavuotoluku	Ilmavuotoluku kuvaa rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveyttä. Nykyisin käytettävä ilmavuotoluku q_{50} ilmaisee, kuinka paljon vuotoilmaa (yksikkönä m^3/h) virtaa ulkovaipan vuotoreittien kautta sisään tai ulos, kun sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on 50 Pa. Aiemmin käytössä ollut ilmavuotoluku n_{50} ilmaisi vuotoilmavirran [m^3/h] suhteessa rakennuksen tilavuuteen [m^3].
Terminen paine-ero	Terminen paine-ero syntyy sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron vaikutuksesta. Sisäilma on talvella ulkoilmaa lämpimämpää ja sen tiheys on ulkoilmaa pienempi. Tämän takia sisäilma pyrkii virtaamaan ulos rakennuksen yläosasta ja ulkoilma sisään alaosaan. Tässä ohjeessa käytettävä termisen paine-eron yksikkö on Pa/m. Termisestä paine-erosta käytetään myös nimityksiä savupiippuvaikutus tai hormivaikutus.
Käyttövoima	Terminen paine-ero silloin, kun sitä hyödynnetään ilman liikkeen aikaansaamiseen painovoimaisessa ilmanvaihdoissa. Käyttövoiman suuruus määräytyy termisestä paine-erosta sekä korkeuserosta korvausilma-aukon ja poistoilmakanavan tai -hormin yläpään välillä.
Tuulenpaine	Tuulesta johtuva painerasitus seinäpintaan. Kokonaispaine vaihtelee rakennuksen seinäpinnoilla tuulen nopeudesta ja suunnasta riippuen. Tuulenpaine vaikuttaa suoraan seinäpinnoilta mitattavaan

sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon. Vaikutus voi hiljaisellakin tuulennopeudella olla suurempi kuin ilmanvaihtojärjestelmällä aikaansaatava staattinen paine-ero.

Tuulenpuoleisella julkisivulla tuulenpaine kasvattaa kokonaispainetta seinäpinnalla, jolloin tälle seinällä sijoitettujen paine-eromittarien mitaama sisätilojen alipaineisuus kasvaa. Suojanpuoleisella ja tuulen-suuntaisilla julkisivuilla vaikutus on päinvastainen, mikä voi kääntää normaalisti alipaineiset tilat ylipaineisiksi ulkoilmaan verrattuina.

1 Tausta

Rakenteiden läpi tapahtuvan vuotoilmavirtauksen tulisi olla mahdollisimman vähäistä, koska monissa nykyisissä rakenteissa sen vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Jos rakennuksen sisällä on suuri yli-
paine, rakenteisiin voi siirtyä merkittäviä määriä sisäilman kosteutta ilmavirtausten mukana aiheuttaen
riskin rakenteiden kosteusvaurioille. Toisaalta, jos rakennuksessa on suuri alipaine, rakenteista ja maa-
perästä voi siirtyä sisäilmaan haitallisessa määrin mikrobeja ja muita epäpuhtauksia.

70- ja 80-luvuilla huomiota kiinnitettiin ainoastaan sisältä ulospäin suuntautuvien ilmavirtausten eh-
käisyyn. Rakennusten ilmatiiveydessä oli puutteita, joten ilmavirtaukset sisältä ulospäin pyrittiin ehkäise-
mään ilmanvaihtojärjestelmällä luotavan alipaineen avulla. Rakentamismääräyksissä ohjeistettiin suun-
nittelemaan ilmanvaihto niin, että paine-ero ulkoilmaan verrattuna on 0...-30 Pa [1]. Rakennukset varus-
tettiin joko pelkällä poistoilmanvaihdolla tai tulo- ja poistojärjestelmien tuloilmavirta suunniteltiin poistoil-
mavirtaa pienemmäksi alipaineisuuden takaamiseksi. RT -korteissa ohjeistettiin mitoittamaan 2 ja 3 -
kerroksisten pientalojen tuloilmavirrat 25-35 % poistoilmavirtoja pienemmiksi [2,3], millä tavoiteltiin ra-
kennuksen alipaineistamista ylintä kerrosta myöten myös kylmällä säällä. Tällainen menettely johtaa
huomattavaan alipaineeseen rakennuksen alaosassa.

90-luvulla huomiota alettiin kiinnittämään myös sisäänpäin suuntautuvien ilmavirtausten ehkäisyyn. Ul-
kovaipan tiiviyyttä parantamalla pyrittiin mm. alentamaan vuotoilmanvaihdosta aiheutuvaa energiankulu-
tusta sekä estämään radonin pääsy sisäilmaan. Panostus ulkovaipan tiiveyteen on tuottanut tulosta.
Vanhimmassa rakennuskannassa ilmavuotoluku (q_{50}) voi ylittää $10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, mutta tällä hetkellä maksi-
miarvona mm. energialaskennassa käytetään lukua $4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ja uudisrakennusten tapauksessa
 $1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ on yleisesti käytetty tavoitearvo [4,5].

Ilmavuotoihin vaikuttavat ulkovaipan ilmavuotoreittien koon ja määrän (ilmavuotoluku) lisäksi myös nii-
den sijainti korkeussuunnassa sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine- ja lämpötilaero ja tuuli. Mikäli ra-
kennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tulo- ja poistoilmavirrat eivät ole yhtä suuria, ilmanvaihto synnyttää
jatkuvan yli- tai alipaineen. Kylmällä säällä ns. terminen paine-ero aikaansaa ilmavirtauksia – ulkoilmaa
pyrkii virtaamaan sisälle rakennuksen alaosasta ja sisäilmaa ulos yläosasta. Myös tuulenpaine aiheut-
taa virtauksia ulkovaipan läpi. Tällöin ilmaa virtaa sisään tuulenpuoleisen julkisivun vuotoreittien kautta
ja ulos muilta julkisivuilta.

Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtojen mittaustarkkuus on melko huono – etenkin mitattaessa pieniä ilma-
virtoja. Tästä syystä yksittäisen huonetilan ilmavirtoja säädettyä toleranssialue on $\pm 20 \%$ suunnitel-
lusta ilmavirrasta, sisältäen mittalaitteen ja mittausmenetelmän virheet. Järjestelmä- (iv-kone) tai huo-
neistokohtaisten ilmavirtojen toleranssialue on $\pm 10 \%$ suunnitellusta ilmavirrasta (Ympäristöministeriön
asetus 1009-2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta), sisältäen mittausvirheet [6].

Viimeisten 30 vuoden aikana rakennusten mitoitusilmavirroissa on tapahtunut kasvua ja ulkovaipan il-
matiiviys on parantunut merkittävästi, mutta ilmanvaihdon mittaus- ja säätötarkkuus ei ole parantunut
samassa suhteessa. Vuoden 1978 rakentamismääräyksissä (D2 1978) asetettu vaatimus oli $\pm 30 \%$
huonekohtaisten ja $\pm 10 \%$ kokonaisilmavirtojen osalta.

Paine-eron mittaus- ja suunnitteluohjeiden puuttuessa ilmanvaihtojärjestelmiä on suunniteltu ja säädetty
vanhojen käytäntöjen mukaisesti. Pelkän koneellisen poiston aikaansaama alipaine ja vuotoilmavirtauk-
set on ja kauan sitten tunnistettu ongelmiksi suurilla mitoitusilmavirroilla varustetuissa rakennuksissa,
kuten kouluissa. Tulo- ja poistoilmanvaihdon kuviteltiin ehkäisevän nämä ongelmat. Viimeisten 10 vuo-
den aikana on kuitenkin julkaistu useita artikkeleita ja opinnäytetöitä, joissa tulo- ja poistoilmanvaihdolla
varustetuista rakennuksista on mitattu aivan yhtä suuria alipaineisuuksia kuin pelkällä koneellisella pois-
toilmavaihdolla varustetusta rakennuksista. Paine-eroja on käsitelty mm. näissä lähteissä:

- Seppänen, Kim (2010). 43 s. Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli. Kuopio: Itä-Suomen yliopisto, Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate.
http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-0056-2/urn_isbn_978-952-61-0056-2.pdf
- Asikainen, Vesa & Pasanen, Pertti & Kokotti, Helmi. (2015) Yleisilmanvaihdon jaksottaisen käytön vaikutukset rakennusten paine-eroihin ja sisäilman laatuun. Sisäilmastoseminaari 2015 julkaisu, s. 247-252. Espoo: SIY Sisäilmatieto Oy.
- Kuurola, Pentti (2015). Diplomityö 90+42 s. Ilmanvaihtolaitteiston aiheuttama paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/23984>
- Ranta-aho, Ilari (2016). Diplomityö 108 s. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Espoo: Aalto-yliopisto.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201603291599>
- Kauppinen, Antti (2018). Diplomityö 102+228 s. Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/26963>

Tulo- ja poistojärjestelmien epätasapainoon ei ole osattu reagoida, koska sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa mitataan yleensä vain ongelmien jo ilmaannuttua, sisäilmatutkimusten yhteydessä, eikä paine-erolle ole ollut rakennuksen ja ilmanvaihtojärjestelmän huomioivia tavoitetasoja ja toimenpiderajoja.

Pyrkimys ulkovaipan ilmapuotojen minimointiin edellyttää tiiveyden parantamisen ohella, että sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero pidetään mahdollisimman pienenä. Ilmanvaihdon mittausepä-tarkkuuden vuoksi paine-eroa ei voida tiiviissä rakennuksessa säätää halutuksi pelkästään ilmavirtamittausten perusteella, vaan on tarpeen mitata myös paine-eroa ja korjata ilmavirtasäätöjä tarvittaessa.

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaaminen on haastavaa, koska mittaustulokseen vaikuttavat myös sääolot, ulkolämpötila, erityisesti tuuli, sen suunta, sekä rakennuksen käyttö, mm. ulko-ovien ja ikkunoiden aukominen.

Oman erityisongelmansa muodostavat erillispoistot, joiden käyntiajat poikkeavat tuloilmakoneiden käyntiajoista. Tiiviissä rakennuksissa erillispoistojen vaikutus kokonaisilmavirtoihin ja painesuhteisiin on pakko huomioida.

Tässä ohjeessa keskitytään tavanomaisiin asuin-, toimisto- ja liikerakennuksiin sekä muihin vastaaviin rakennuksiin, joiden sisällä ei ole suuria kosteuskuormia eikä poikkeuksellisia vaatimuksia sisäilman puhtaudelle.

2 Paine-eron mittausohjeen sisältö

Tässä ohjeessa keskitytään ensisijaisesti koneellisten tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmien vaikutukseen rakennuksen painesuhteisiin. Asuinrakennusten osalta on otettu mukaan myös koneellinen poistoilmanvaihto sen yleisyyden vuoksi.

Luvussa 3 esitellään muutamia yleisiä ilmanvaihdon totutus- ja mitoitusratkaisuja sekä niiden ongelmat paine-erojen hallinnan suhteen.

Luvussa 4 annetaan ohjeet sekä sisä- ja ulkoilman että rakennuksen huonetilojen välisten paine-erojen mittaamiseen.

Ohjeen liitteessä 1 käsitellään sääolojen ja rakennuksen käytön vaikutusta paine-eroihin sekä annetaan ohjeita mittaustulosten tulkintaan.

Ohjeen liite 2 on mukana vain keskustelun avaamiseksi paine-eron tavoitetason määrittelemiseksi. Tämä liite jää pois mittausohjeen lopullisesta versiosta.

3 Aiemmin käytössä olleet ohjeet ja yleiset suunnitteluratkaisut

Rakennusten paine-eron suunnittelulle sekä paine-eron mittaamiselle ei ole aiemmin ollut yksityiskohtaista ohjeistusta. Painesuhteet on pyritty säätämään oikeanlaisiksi ilmanvaihdon mitoituksella.

Rakentamismääräyksissä on annettu seuraavat **ohjeet**:

- *Ilmanvaihdon suunnittelussa on yleensä pyrittävä aikaansaamaan luontevat painesuhteet, jolloin ilmapuhtaus tapahtuu puhtaammista tiloista likaisempiin päin. (D2 1978)*
- *Korkeiden, yli 5 kerroksisten, rakennusten painesuhteet ovat yleensä helpoimmin hallittavissa jakamalla rakennus pystysuunnassa erillisiin ilmanvaihtovyöhykkeisiin. (D2 1978)*
- *Rakennuksen painesuhteiden tulee olla suunnitelmien mukaiset. Tämä voidaan varmistaa esim. savukokein. (D2 1978)*
- *Rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi, jotta voidaan välttyä mm. kosteusvaurioilta rakenteissa sekä mikro-organismien aiheuttamilta terveyshaitoilta. Alipaine ei kuitenkaan saa olla suurempi kuin 30 Pa. (D2 1987)*
- *Jos rakennusalueen maaperistä erittyy radonia tai muita epäpuhtauksia, järjestetään rakennuksen painesuhteet siten, etteivät ne edistä epäpuhtauksien siirtymistä rakennukseen (D2 1987)*

Vuoden 1987 rakentamismääräyskokoelman osassa D2 annettiin myös seuraava **määräys**:

Tavanomainen käyttö tai sään vaihtelu ei saa merkittävästi muuttaa rakennuksen tai huonetilojen painesuhteita eikä heikentää ilmanvaihtoa.

Samansisältöinen määräys on myös vuosina 2003 ja 2012 julkistetuissa päivityksissä.

Ilmanvaihdon suunnittelua on ohjeistettu myös RT- ja LVI -ohjekorteissa. Vuonna 1987 julkistettu LVI ohjekortti 30-10085 *Tiiviin pientalon ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluohje – koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän tuloilmapuolen suunnittelu* ohjeisti mitoittamaan pientalojen koneellisten ilmanvaihtojärjestelmien tuloilmavirran seuraavasti:

- 1-kerroksisten rakennusten tuloilmavirta 15 % kokonaispoistoilmavirtaa pienempi
- 2-kerroksisten rakennusten tuloilmavirta 25 % kokonaispoistoilmavirtaa pienempi
- 3-kerroksisten rakennusten tuloilmavirta 35 % kokonaispoistoilmavirtaa pienempi

LVI -ohjekortti (RT 56-10346) *Tiiviin pientalon ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluohje – koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän ulkoilman sisäänoton suunnittelu* ohjeisti käyttämään korvausilmaventtiilien mitoituspaine-erona 10 Pa ja mitoitusilmavirtana 55 % rakennuksen kokonaispoistoilmavirrasta.

LVI -ohjekortissa 30-10084 (RT 56-10346) *Tiiviin pientalon ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluohje – ilmanvaihtojärjestelmien poistoilmapuolen suunnittelu* tiiviin pientalon kriteeriksi on määritetty ilmavuotoluku $n_{50} = 1 \text{ l/h}$. Vaikka tätä ei ohjekorteissa ole suoraan sanottu, näillä mitoituskriteereillä pientalot on pyritty pitämään 10 Pa alipaineisina ulkoilmaan verrattuna.

Kaikki edellä mainitut LVI -ohjekortit on poistettu käytöstä 2012-2014 eikä niitä ole korvattu samansisällöisillä korteilla.

Muissa rakennustyypeissä perinteisiä ratkaisuja ovat olleet tuloilmavirran mitoittaminen 5–10 % poistoilmavirtaa pienemmäksi sekä rakennuksen alipaineistaminen WC-tilojen jatkuvasti käynnissä olevilla erillispoistopuhaltimilla. Muiden erillispoistojen ja tehostusten vaikutus painesuhteisiin on usein jäänyt kokonaan huomioimatta ts. painesuhteita koskevasta määräyksestä ei ole piitattu.

3.1 Asuinpientalot

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto on erillispientaloissa yleistynyt vallitsevaksi ratkaisuksi jo 90-luvun aikana. Pientalojen ilmanvaihtosuunnittelua on ohjannut vahva oletus ilmanvaihdolla aikaansaatavan alipaineen välttämättömyydestä. On kuviteltu, että mitoittamalla ja säätämällä tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmien poistoilmavirta 10–20 % tuloilmavirtaa suuremmaksi, saadaan täysin ehkäistystä kostean huoneilman vuotaminen rakenteisiin, myös 2-kerroksisissa rakennuksissa.

Pientalossa, jonka ilmatiiviyys on keskimääräinen $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, koneellisen poistoilmanvaihdon luoma alipaine jää alle 10 Pa vaikkei rakennuksessa olisi korvausilmaventtiileitä. Tämä johtuu ensisijaisesti asuinrakennusten pienistä mitoitusilmavirroista.

Taulukko 1. Esimerkkirakennukset 1 ja 2.

	Rakennus 1 keskimääräinen ilmatiiviyys	Rakennus 2 hyvä/erinomainen ilmatiiviyys
Tyyppi	Pientalo	Pientalo
Pinta-ala ja tilavuus	120 m ² 300 m ³	120 m ² 300 m ³
Vaipan ala ja ilmavuotoluku q ₅₀	360 m ² 4 m ³ /(m ² ·h)	360 m ² 1 tai 0,3 m ³ /(m ² ·h)
Ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi ja mitoitusilmavirrat	koneellinen poisto -60 l/s	koneellinen tulo- ja poisto +50/-60 l/s

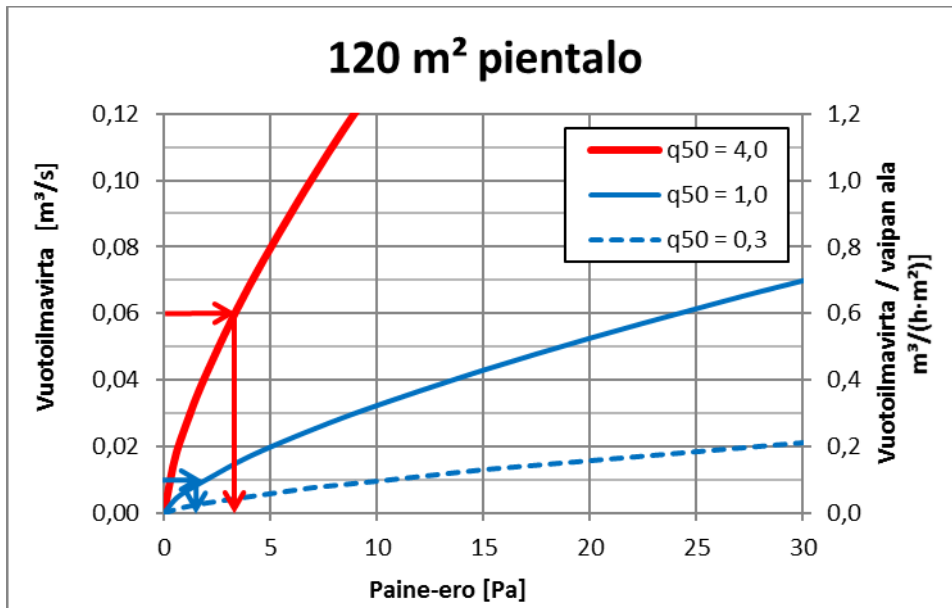
Esimerkkirakennuksessa 2 koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon poistoilmavirta on mitoitettu 10 l/s tai 20 % tuloilmavirtaa suuremmaksi.

Ulkovaipan ilmavuotoluku q_{50} on määritetty 50 Pa paine-erolla. Kun paine-ero on tätä pienempi, vuotoilmavirta q_v voidaan määrittää kaavalla 1

$$q_v = q_{50} \left(\frac{\Delta p}{50 \text{ Pa}} \right)^n A_{vaippa} \quad (1)$$

missä q_{50} on vuotoilmavirta [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] 50 Pa paine-erolla
 Δp on paine-ero [Pa]
 n on ilmavirtauksen (turbulenttinen/laminaarinen) tyypistä riippuva eksponentti (0,5–1), tässä 0,7 (sekavirtaus)
 A_{vaippa} ulkovaipan pinta-ala, tässä 360 m²

Kuvassa 1 on esitetty vuotoilmavirran ja rakennuksen alipaineisuuden välinen yhteys kolmella eri tiiviydellä (q_{50} 4,0, 1,0 tai 0,3 m³/(h·m²)). Epätiivisissä rakennuksissa ($q_{50} = 4,0$) on koneellinen poisto ja tiivisissä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto.



Kuva 1. Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero esimerkkirakennuksissa 1 ja 2.

Tiiveydeltään keskinkertaisessa esimerkkirakennuksessa 1 koneellinen poistoilmavaihto aikaansaa 3,3 Pa alipaineen. Rakennukseen saadaan riittävästi korvausilmaa ulkovaipan vuotojen kautta. Toisaalta ilmavirtausta ulkovaipan läpi sisälle ei voida kokonaan ehkäistä lisäämällä rakennukseen korvausilmaventtiileitä. Koneelliseen poistoon tarkoitetut korvausilmaventtiilit on yleensä suunniteltu 10–15 Pa paine-erolle, jolloin niiden kautta saatava ilmavirta jää pieneksi 3 Pa paine-erolla ja valtaosa korvausilmasta kulkee edelleen rakenteiden vuotojen kautta.

Esimerkkirakennuksessa 2 on koneellinen tulo- ja poistoilmavaihto, jonka poistoilmavirta on säädetty 20 % tuloilmavirtaa suuremmaksi. Ilmavuotoluvun ollessa 1,0 m³/(h·m²) tämä aikaansaa 1,9 Pa alipaineen. Jos rakennuksen ilmatiiviyys on poikkeuksellisen hyvä (ilmavuotoluku 0,3), alipaine kasvaa 10 pascaliin.

Esimerkkien perusteella rakenteiden tiiviyden parantaminen ei aiheuta suuria ongelmia yleisilmanvaihdon toiminnalle pientaloissa.

Tilanne muuttuu täysin toisenlaiseksi, kun tarkasteluun otetaan erillispoistot. Tyypillinen liesituulettimien nimellisilmavirta on 350 m³/h eli vajaa 100 l/s ja ilmanvaihtokoneisiin liitettyjen tehostussäätöisten liesikupujen mitoitusilmavirta -8/-25 l/s (normaali/tehostettu).

Liesituuletin tarvitsee korvausilmaa lähes 100 l/s ja tehostussäätöinen liesikupu tehostuksen aikana 17 l/s. Tiiveydeltään keskinkertaisessa esimerkkirakennuksessa 1 liesituuletin kasvattaa sisätilan alipaineisuuden noin 10 Pa tasolle, mikä on edelleen hyväksyttävällä alueella. Tiiveydeltään hyvässä (ilmavuotoluku 1,0) esimerkkirakennuksessa 2 alipaineen pitäisi kasvaa 50 pascaliin, jotta ulkovaipan läpi saataisiin tarvittava korvausilmavirta. Käytännössä liesituulettimen ilmavirta jää rakennuksen alipaineistumisen vuoksi suunniteltua pienemmäksi.

Jos rakennuksen ilmatiiviyys on poikkeuksellisen hyvä (ilmavuotoluku 0,3), pelkkä tehostussäätöinen liesikupukin riittää tuottamaan liiallisen alipaineen. Teoriassa alipaine kasvaa esimerkin lähtötiedoilla 32 pascaliin, kun alipaineen vaikutus iv-koneen ilmavirtoihin jätetään huomioimatta.

Pientaloissa ei ole yleensä huomioitu liesituulettimen tai -kuvun korvausilman tarvetta. Myös ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton huurteenesto voi aiheuttaa voimakkaan alipaineisuuden jaksoja. Näin käy, jos huurteenesto perustuu tuloilmapuhaltimen pysäyttämiseen tai ohjaamiseen minimikierrosluvulle sulatusjakson ajaksi.

Vaikkei ajoittaisen alipaineen katsottaisi aiheuttavan merkittävää haittaa rakenteiden ilmapuotojen johdosta, se tuottaa silti ongelmia tulisijoin varustetuissa rakennuksissa.

Osassa pientalojen ilmanvaihtokoneita on ns. takkakytkintoiminto, joka kasvattaa tuloilmavirtaa ja vähentää alipaineisuutta tai jopa lievästi ylipaineistaa rakennuksen. Toiminto on nimensä mukaisesti tarkoitettu tuottamaan korvausilmaa takalle erityisesti sytytysvaiheessa, mutta sitä voidaan käyttää myös tuottamaan korvausilmaa keskuspolynimurille tai liesituulettimelle. Useimmissa pientaloissa ilmanvaihtokoneiden kapasiteetti ei kuitenkaan riitä kattamaan liesituulettimien korvausilman tarvetta.

Takkakytkintoiminnon ollessa aktivoituna lämmöntalteenoton huurtumisen todennäköisyys kasvaa. Huurteenestotoiminto yleensä ohittaa takkakytkintoiminnon, minkä seurauksena rakennus voi varoitusta muuttua ylipaineisesta alipaineiseksi.

3.2 Asuinkerrostalot

3.2.1 Koneellinen poistoilmanvaihto

Asuinkerrostalojen tyypillinen ilmanvaihtoratkaisu on koneellinen poistoilmanvaihto. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto on muuttunut vallitsevaksi vasta vuoden 2003 jälkeen.

Betonielementtirakenteisten kerrostalojen ilmatiiviys on parempi kuin vanhan pientalokannan ilmatiiviys, minkä lisäksi ulkovaipan pinta-ala suhteessa rakennuksen tilavuuteen ja mitoitusilmavirtoihin on pienempi. Tämän seurauksena koneellinen poistoilmanvaihto tuottaa rakennukseen liian suuren alipaineen, jos korvausilmaventtiileitä ei ole riittävästi tai ne on suljettu. Uusissa, tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa, rakennuksissa haasteita tuottaa keittiöiden ilmanvaihdon toteutus.

Vanhimmissa koneellisen poiston kerrostaloissa ei ollut alun perin korvausilmaventtiileitä, mutta näihin on yleensä lisätty karmiventtiilit ikkunoihin ikkuna- tai julkisivusaneerauksen yhteydessä. Mitoituskäytännöt ovat olleet erittäin vaihtelevia:

- a) 1 korvausilmaventtiili (tyypillisesti karmiventtiili) joka ikkunaan pl. keittiön ja pesutilojen ikkunat
- b) huoneistoon on mitoitettu puolitetulle poistoilmavirralla riittävät korvausilmaventtiilit
- c) huoneistoon on mitoitettu tehostetulle poistoilmavirralla riittävät korvausilmaventtiilit
- d) kuten c, minkä lisäksi on vaadittu, että päämakuuhuoneen korvausilmavirta on aina vähintään 12 l/s (puolitetulla ilmavirralla), käytännössä tämä vaatimus edellyttää korvausilmaventtiilien mitoitus 24 l/s ilmavirralla (tehostusjakson aikana)

Poistoilmavirtojen mitoituksessakin on suurta hajontaa pienten asuntojen kohdalla. Suurimpien huoneistojen tapauksessa on ollut helppoa mitoittaa ilmanvaihto niin, että ohjearvojen mukaiset tilakohtaiset poistoilmavirrat täyttyvät (ns. tehostusjakson aikana) ja ilmanvaihtokerroin on vähintään 0,4 1/h (ns. puolituksen aikana). Kokonaispoistoilmavirta on -20/-40 l/s (puolitus/täysi teho) suuruusluokkaa ja ilmanvaihtokerroin 0,4/0,8 1/h. Suurissa huoneistoissa on niin monta ikkunaa, ettei tuota suuria ongelmia löydy asennustilaa viidelle korvausilmaventtiilille. Sekä karmiventtiilien että ulkoseinän läpivientiin asennettavien korvausilmaventtiilien tyypillinen mitoitusilmavirta 15 Pa paine-erolla on 8 l/s.

Pienten huoneistojen mitoituskäytännöt ovat vaihdelleet. Äärilaitoja ovat edustaneet nämä kaksi vaihtoehtoa:

- Mitoitus ilmanvaihtokertoimen mukaan niin, että puolitetulla ilmavirralla ilmanvaihtokerron on enintään 1,0 1/h, mikä voi kaikkein pienimmissä huoneistoissa johtaa vain hieman yli -10 l/s tilakohtaisiin mitoitusilmavirtoihin sekä keittiössä että pesuhuoneessa.

- Orjallinen tilakohtaisten ohjearvojen noudattaminen, esim. keittiö -20 l/s, KPH -15 l/s, jolloin kokonaispoistoilmavirta vähintään -35 l/s. Huoneiston ilmanvaihtokerroin puolitetulla ilmavirralla vaihtelee 1,4–0,4 1/h huoneiston koosta (18 m² yksiö – 60 m² kaksio) riippuen. Tehostusjaksojen aikana ilmanvaihtokerroin voi pienissä huoneistoissa olla yli 2 1/h.

Joka tapauksessa pienimpien huoneistojen mitoitusilmavirta on 30 l/s suuruusluokkaa. Korvausilma-venttiilien mitoitusilmavirta on tyypillisesti enintään 8 l/s, joten korvausilmaventtiileitä tarvitaan 3–4. Etenkin yksiöiden ikkunoihin on mahdotonta asentaa riittävää määrää korvausilmaventtiileitä, minkä perusteella on oletettavaa, että näissä esiintyy liiallista alipaineisuutta tai korvausilma saadaan pääasiassa sisäisinä vuotoina mm. porrashuoneesta.

Liiallista alipainetta aiheuttavat myös korvausilmaventtiilien sulkeminen vetohaitan vuoksi sekä korvausilmaventtiilien alimitoitus (vaihtoehdot a ja b). Liiallista alipainetta aiheuttaa myös ilmanvaihdon ajautuminen epätasapainoon, kun osa asukkaista muuttaa oman huoneistonsa poistoilmaventtiilien säätöjä tai tukkii ne kokonaan, jolloin kanaviston alipaine ja muiden huoneistojen poistoilmavirta kasvavat.

Suuri määrä korvausilmaventtiileitä (vaihtoehto d) altistaa rakennuksen tuulenpaineesta johtuvalle vaihtelulle. Tällöin ilmaa virtaa sisään tuulenpuoleisen julkisivun venttiileistä ja ulos muiden julkisivujen venttiileistä, mikä aiheuttaa vetohaittaa viileällä säällä.

3.2.2 Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto

Koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa kerrostaloissa yleisiä ratkaisuja ilmanvaihdon toteutukseen ovat:

- huoneistokohtainen ilmanvaihtokone + ilmanvaihtokoneeseen liitetty liesikupu
- huoneistokohtainen ilmanvaihtokone + erillispoistoon (yhteiskanavapoisto) liitetty tehostussäätöinen liesikupu
- keskitetty ilmanvaihtokone + tehostussäätöinen liesikupu

Kaikissa em. vaihtoehtoissa on paine-eron hallintaa liittyviä riskejä.

Huoneistokohtaisia ilmanvaihtokoneita käytettäessä ilmavirtojen mitoitus on helppoa, mutta takeita ilmavirtojen ja paine-erojen pysyvyydestä ei ole. Huoneistokohtaisissa ilmanvaihtokoneissa ei ole vakiokanavapainesäätöä eikä suodatinvahteja, joten suodattimien likaantuminen muuttaa ilmavirtoja. Tuloilman esisuodattimina sekä poistoilmasuodattimina käytetään yleisesti pienikokoisia tasosuodattimia, jotka voivat tukkeentua nopeasti. Suositeltu vaihtoväli on 6 kk, mutta tällaisten tasosuodattimien kunto pitäisi tarkistaa 3 kk välein ja tasosuodattimien pinnalle kertynyt pölykerros tarvittaessa poistaa imuroimalla.

Erityisesti keväällä ja alkukesällä ulkoilman pöly, hyönteiset ja kasvien siemenet voivat tukkia tuloilmasuodattimen nopeasti. Talvella ulkoilmassa on vähän karkeaa pölyä, jolloin ensimmäisenä saattaakin tukkeentua poistoilmasuodatin, mikä johtaa huoneiston ylipaineistumiseen.

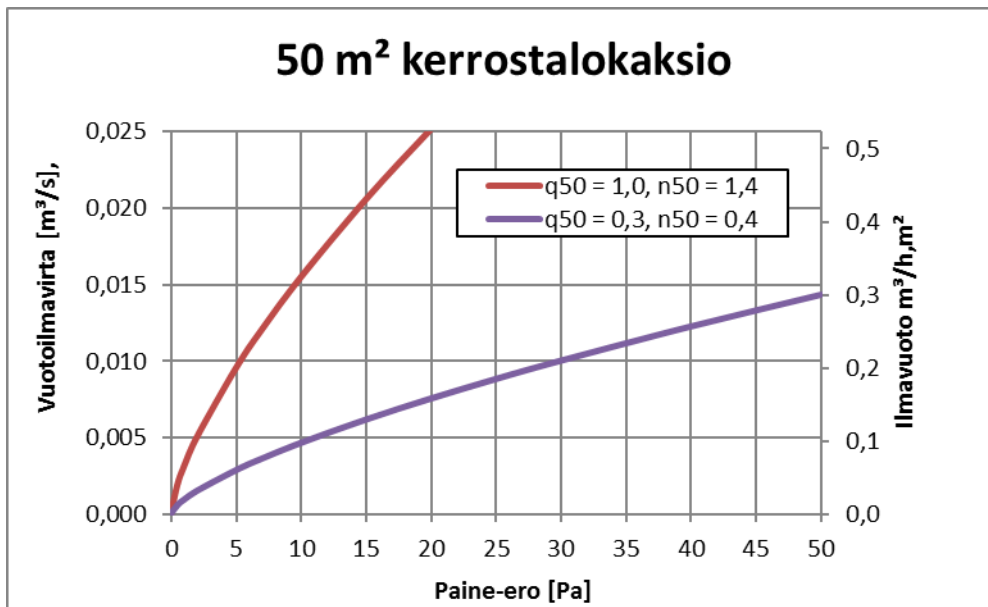
Huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden ylläpitoon ei ole yhtenäistä käytäntöä. Osassa rakennuskantaa huolto on jätetty kokonaan asukkaiden vastuulle, jolloin suodattimia ei ehkä vaihdeta vuosiin. Toisaalta suodattimien vaihto kahdesti vuodessa on saatettu siirtää huoltoyhtiön tehtäväksi, mutta tämäkään ei riitä takaamaan ilmavirtojen ja painesuhteiden pysymistä koko ajan oikeanlaisina.

Huoneistokohtaisten iv-koneiden lämmöntalteenoton huurteenestoratkaisuna käytetään yleisesti tuloilmapuhaltimen sammuttamista tai ohjausta minimikierrosluvulle, mikä johtaa huoneiston voimakkaaseen alipaineistumiseen sulatusjaksojen aikana.

Keskitettyissä ilmanvaihtojärjestelmissä käytettävissä ilmanvaihtokoneissa lämmöntalteenoton huurteenesto ei vaikuta ilmavirtoihin. Näissä järjestelmissä haasteena on huoneistokohtaisen säädettävyyden, käytännössä rakentamismääräysten suosittaman huoneistokohtaisen tehostusmahdollisuuden, toteutus.

Yleisin tapa on ollut keittiön varustaminen tehostussäätöisellä liesikuvulla. Kun liesikuvun ilmavirta on säädettävissä -8 ja 25 l/s välillä, tämä riittää useimmiten aikaansaamaan suositellun 30 % muutoksen huoneiston kokonaispoistoilmavirrassa.

Kuvassa 2 on esitetty kerrostalohuoneiston vuotoilmavirran ja paine-eron suhde kahdella eri tiiviystasolla.



Kuva 2. Tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapainon aikaansaama paine-ero tiiviissä ja erittäin tiiviissä 50 m² kerrostalohuoneistossa.

Kuvan 2 laadinnassa käytetyt lähtöarvot:

- huoneiston pinta-ala 50 m², tilavuus 125 m³
- vaipan pinta-ala 172 m² sisältäen myös naapurihuoneistojen ja porrashuoneen vastaiset väliseinät ja -pohjat
- ilmavuotoluku q_{50} 1,0 tai 0,3 m³/(m²·h)

Kuvassa 2 on esitetty myös aiemmin käytössä olleet, tilavuuteen suhteutetut ilmavuotoluvut (n_{50}).

Kaksion mitoitusilmavirta on 30-40 l/s suuruusluokkaa riippuen ensisijaisesti siitä, onko huoneistossa saunaa. Poistoilmavirta mitoitetaan yleensä 10-15 % eli 3-5 l/s tuloilmavirtaa suuremmaksi, minkä voi odottaa kuvan 2 perusteella aikaansaavan -1...-11 Pa alipaineen rakenteiden tiiviyydestä riippuen.

Todellinen paine-ero voi vaihdella huomattavasti enemmän, koska

- ilmavirtojen mittaus- ja säätöepävarmuus on samaa suuruusluokkaa kuin em. erotus tulo- ja poistoilmavirtojen välillä
- kun myös naapurihuoneistoissa ja porrashuoneessa on samansuuruinen alipaine, korvausilman saanti on yksinomaan ulkoseinän ilmavuotojen varassa

Liesikuvun poistoilmavirran tehostus kasvattaa tulo- ja poistoilmavirtojen erotuksen noin 20 litraan sekunnissa, jolloin alipaine voi tiiviissä rakennuksessa kasvaa yli -30 pascaliin. Tässä tilanteessa kuvan 2 arvot pitävät paremmin paikkansa, koska voimakkaan alipaineen seurauksena korvausilmaa saadaan myös sisäisinä ilmavuotoina naapurihuoneistoista ja porrashuoneesta.

Rakenteen ilmavuotojen varaan jätetty korvausilman saanti aiheuttaa sitä suuremman alipaineen, mitä tiiviimpiä rakenteet ovat ja mitä pienempi huoneisto on kyseessä.

3.3 Vakioilmavirtajärjestelmät

3.3.1 Toimistorakennukset

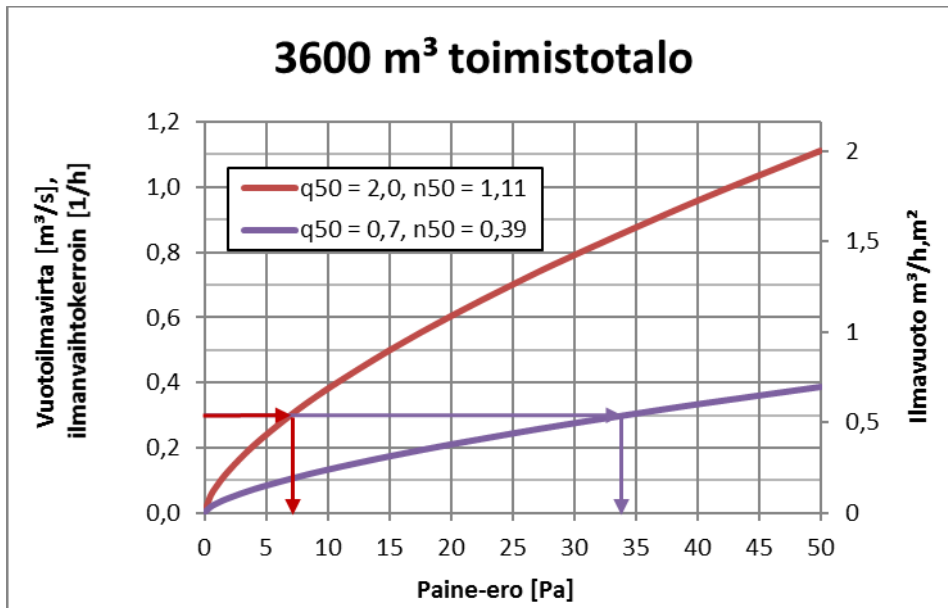
Toimistorakennuksissa on useimmiten lämmöntalteenotolla varustetut tulo- ja poistoilmakoneet, jotka on suunniteltu käymään vain rakennuksen käyttöaikoina. Näiden lisäksi on jatkuvasti käynnissä olevia ns. WC-poistopuhaltimia (erillispoistot). Näihin WC-poistoihin on WC-tilojen lisäksi liitetty siivoustilat, mahdollisesti myös pukuhuonetilat tai kahvikeittiöiden poistot.

Tarkoitus on ollut, että WC-poistoilla huolehditaan käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdosta sekä ylläpidetään jatkuvasti pientä alipainetta ulkoilmaan verrattuna. Ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistoilmavirrat (yleispoisto) on ideaalitapauksessa mitoitettu yhtä suuriksi, joten näiden toiminnan ei pitäisi vaikuttaa rakennuksen painesuhteisiin.

Toimistotilojen mitoitusilmavirta on yleensä 1,5–2 l/(s·m²). Jos WC-poistojen ilmavirta on noin 10 % kokonaisilmavirrasta, päädytään aika lähelle suositeltua käytönajan ulkopuolisen ajan ilmanvaihdon mitoitusta 0,15 l/(s·m²).

Taulukko 2. Esimerkkirakennus 3, kaksikerroksinen toimistotalo

Tyyppi	Toimistotalo 2 kerrosta	ei ruokalaa, ei pysäköintihallia
Mitat	pituus×leveys kerrosala tilavuus ulkovaipan ala	n. 40×15 m 1 200 m ² 3 600 m ³ 2 000 m ²
Ilmavuotoluku q ₅₀	keskimääräinen ilmatiiviys hyvä ilmatiiviys	2,0 m ³ /(m ² ·h) 0,7 m ³ /(m ² ·h)
Ilmanvaihdon mitoitusilmavirrat	koneellinen tulo- ja poisto WC-tilat (erillispoisto) kokonaisilmavirta	+2,4/-2,4 m ³ /s (2 dm ³ /(s·m ²)) -0,3 m ³ +2,4/-2,7 m ³ /s (+12,5 %)



Kuva 3. Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero ulkovaipaltaan epätiivissä ja tiiviissä toimistorakennuksessa.

Esimerkin 3 toimistorakennuksessa WC-poistojen ilmavirta on 0,3 m³/s, mikä on 11 % kokonaisilmavirrasta (2,7 m³/s). Epätiivissä rakennuksessa jatkuvatoimiset WC-poistot ylläpitävät -7 Pa alipainetta ulkoilmaan verrattuna. Tiiviissä rakennuksessa samanlainen ilmanvaihdon mitoitus tuottaa -34 Pa alipaineen.

Ohjearvo käyttöajan ulkopuolisen ajan ilmanvaihtoon on 0,2 1/h. Esimerkkirakennuksessa tähän riittäisi 0,2 m³/s ilmavirta. Pelkkää koneellista poistoa (WC-tilojen erillispoisto) käytettäessä tämä mitoitus tuottaisi -4...-18 Pa alipaineen rakennuksen tiiviydestä riippuen.

3.3.2 Muut vakioilmavirtajärjestelmillä varustetut rakennukset

Edellä esitetyn kaltaisia vakioilmavirtajärjestelmiä käytetään kaikentyyppisissä rakennuksissa. Painesuhteiden hallinnan kannalta ongelmallisimpia ovat rakennukset, joissa erillispoistojen ilmavirta on selvästi suurempi kuin 10 % kokonaisilmavirrasta.

Päiväkoti on hyvä esimerkki rakennuksesta, jossa WC- ja pesutilojen poistoilmavirta voi olla suuri suhteessa ilmanvaihtojärjestelmän kokonaisilmavirtaan, mikä voi johtaa liialliseen alipaineeseen öisin, kun tuloilmakoneet ovat seis.

Jos rakennuksessa on WC-tilojen lisäksi muitakin erillispoistoja, joiden käyntiajat poikkeavat tuloilmakoneiden käyntiajoista, rakennus on tosiasiallisesti muuttuvailmavirtaisella ilmanvaihdolla varustettu.

3.3.3 Yksittäisten huonetilojen ilmanvaihdon epätasapaino

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron hallinnan lisäksi ongelmia esiintyy yksittäisten huonetilojen tasolla. Kun mitoitusilmavirrat ovat suuria, pienikin ero huoneen tulo- ja poistoilmavirtojen välillä voi tuottaa suuren paine-eron. Ongelmia esiintyy erityisesti opetus-, neuvottelu- ja auditoriotiloissa, joiden mitoitusilmavirta on 3–5 l/(s·m²).

Taulukon 3 esimerkissä 60 m² koululuokan pinnoista puolet (esim. 2 seinää ja alapohja) ovat osa rakennuksen ulkovaippaa muiden rajautuessa sisätiloihin. Kaikkien seinien, alapohjan ja välipohjan ilmavuotoluku on 0,7 l/(s·m²). Rakennus on keskimäärin -5 Pa alipaineinen ulkoilmaan verrattuna. Ilmavirtojen poikkeamat ovat sallituissa rajoissa (± 20 % sisältäen mittalaitteen ja mittausten menetelmän virheet).

Taulukko 3. Esimerkki ilmvirran säätöepätarkkuudesta johtuvasta paine-erosta

Suunniteltu ilmvirta tulo/poisto	Todellinen ilmvirta (poikkeama suunnitel- tuun verrattuna)	Paine-ero	Vuotoilmavirta
+200 / -200 l/s	+180/-220 l/s (-10 / +10 %)	sisä/ulko -10 Pa huone/käytävä -5 Pa	ulkovaipan läpi 25 l/s muista sisätiloista 15 l/s
+200 / -200 l/s	+220/-180 l/s (+10 / -10 %)	sisä/ulko +5 Pa huone/käytävä +10 Pa	sisältä ulos 15 l/s muihin sisätiloihin 25 l/s

Väliseinien ilmatiiviys on yleensä hyvä, jos rakenteista on pyritty tekemään ääntä eristäviä. Tällöin vä- liovetkin ovat yleensä kynnyksin ja tiivistein varustettuja. Tiiviissä rakennuksessa, jossa väliovet ovat ns. desibelioivia, tilojen väliset paine-erot voivat olla jopa taulukossa 3 esitettyjä suurempia.

3.4 Muuttuvailmavirtaiset järjestelmät

Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä ilmvirtaa säädetään tarpeen mukaan. Yleisesti käytettyjä sää- töratkaisuja ovat mm.

- huoneilman hiilidioksidipitoisuuteen ja lämpötilaan perustuva säätö (auditoriot, neuvotteluhuo- neet)
- aikaohjelmat
- ohjaus käsikytkimellä tai läsnäoloanturilla (käytönajan tehostus)

Ilmanvirran säätö voi olla portaaton tai portaallinen. Portaattomassa säädössä ilmvirtaa muutetaan esi- merkiksi ilmanvaihtokoneen puhaltimien kierrosnopeussäädöllä, huonekohtaisilla ilmvirtasäätimillä (IMS) tai aktiivisilla päätelaitteilla. Portaallinen säätö voidaan toteuttaa esimerkiksi

- ohjaamalla iv-koneen 2-nopeuksisten puhaltimien käyntinopeutta
- huone- tai vyöhykekohtaisten tehostuspeltien avulla
- ohjaamalla erillisiä tehostuspuhaltimia

Tilat, joissa on kohdepoistoja, joiden ilmvirta on erikseen säädettävissä, pitäisi myös luokitella muuttu- vailmavirtaisiksi. Tällainen kohdepoisto voi olla esimerkiksi koululuokkaan sijoitettu vetokaappi, jonka poistopuhallinta ohjataan käsi- tai lisäaikaakytkimellä tai yleisilmanvaihdon käyntiajoista poikkeavalla ai- kaohjelmalla.

3.4.1 Tasapainoisiksi suunnitellut järjestelmät

Neuvotteluhuoneiden ja liikuntasalien kaltaisissa tiloissa muuttuvailmavirtaiset järjestelmät on yleensä suunniteltu niin, että tulo- ja poistoilmavirrat muuttuvat samassa suhteessa. Teoriassa ilmvirtasäädön ei pitäisi vaikuttaa sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon. Käytännössä, ilmvirtamittauksen epätark- kuudesta johtuen, tulo- ja poistoilmavirrat eivät pysy koko ajan täsmälleen yhtä suurina ja tilan paine-ero ulkoilmaan tai muihin sisätiloihin verrattuna voi vaihdella ylipaineesta alipaineeseen.

3.4.2 Kohdepoistojärjestelmät vailla korvausilmaa

Täysin hallitsemattomia järjestelmiä edustavat ratkaisut, joissa (yleis)ilmanvaihtojärjestelmä on vakioilmavirtajärjestelmä, mutta rakennuksessa on myös erikseen ohjattavia erillispoistoja. Tyypillinen esimerkki on vanhan koulurakennuksen teknisen työn luokka, jossa on purunpoistojärjestelmä, ahjon huuva ja maalauskaappi, joita kaikkia ohjataan käsikäyttökytkimin.

3.4.3 Korvausilmaa tuottavat ratkaisut

Uudemmissa rakennuksissa erillispoistojen korvausilman tarve on pyritty huomioimaan, mutta ratkaisut ovat puutteellisia.

Yleinen tapa on varustaa tilan yleispoisto tehostuspellillä tai ilmavirtasäätimellä.

3.4.3.1 Tehostuspeltijärjestelmä

Tehostuspeltijärjestelmä voidaan toteuttaa kahdella tapaa.

Tapa 1:

Tilassa on jokaista erillispoistoa kohti tehostuspellillä varustettu tulo- tai korvausilmalaite, joka tuottaa erillispoiston ilmavirtaa vastaavan määrän korvausilmaa. Tehostuspellin tulee aueta, kun kohdepoisto kytketään päälle.

Tapa 2:

Tilassa on jokaista erillispoistoa kohti tehostuspellillä varustettu poistoilmalaite (yleispoisto), jonka ilmavirta on mitoitettu erillispoiston ilmavirtaa vastaavaksi. Poistoilmalaitteen moottoripelti on normaalisti auki ja se sulkeutuu, kun erillispoisto kytketään päälle.

Tavoitteena on, ettei erillispoistojen käyttö vaikuttaisi painesuhteisiin. Käytännössä tämä ei toteudu, koska

- erillispoistojen tarkat ilmavirrat eivät ole tiedossa (ei mitattavissa tai ilmavirta ei pysy vakiona, vaan muuttuu esimerkiksi käsikäyttöisten sulkupeltien asennosta riippuen)
- kaikille erillispoistoille ei ole suunniteltu korvausilmalaitetta tai korvausilmavirta on mitoitettu erillispoiston ilmavirtaa pienemmäksi
- järjestelmään on tehty muutoksia, muutettu kohdepoistojen lukumäärää tai ilmavirtoja, mutta korvausilman määrää säättävät laitteet on jätetty ennalleen tai poistettu käytöstä

3.4.3.2 Ilmavirtasäätöinen järjestelmä

Ilmavirtasäätöisessä järjestelmässä erillispoistojen tarvitsemaa korvausilmaa tuotetaan joko säätämällä tilan tuloilmavirtaa tai yleispoiston ilmavirtaa. Edistyneimmissä järjestelmissä kaikille kohdepoistoille on määritetty nimellinen ilmavirta ja automaatiojärjestelmä muuttaa tilan tulo/yleispoisto -suhdetta korvausilman tuottamiseksi.

Ilmavirtasäätöisissäkin järjestelmissä on suuria ongelmia paine-eron hallinnassa, koska

- automaatiojärjestelmään asetellut erillispoistojen ilmavirrat eivät vastaa todellisia ilmavirtoja
- kaikkia erillispoistoja ei ole liitetty automaatioon (käyntitilatieto)

- toteutus ei ole suunnitelmien mukainen
- erillispoistoihin on tehty muutoksia, mutta automaatio on päivittämättä
- laitteistossa on vikoja

Mitoitusilmavirrat ovat tällaisissa tiloissa yleensä suuria, jolloin ilmavirtasäädön ongelmista johtuen tila voi ajoittain olla jopa 30 Pa yli- tai alipaineinen muihin sisätiloihin verrattuna.

4 Paine-eron mittaaminen

4.1 Hetkellinen mittaus

4.1.1 Käyttötarkoitus

Hetkellisellä paine-eromittauksella voidaan määrittää mitattavan tilan ja ulkoilman välinen paine-ero tai kahden huonetilan välinen paine-ero mittaushetkellä.

Yleensä halutaan selvittää rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tuottama paine-ero. Tällöin mittaajan tulee selvittää, mikä ilmanvaihtoratkaisu mitattavassa tilassa on sekä päättää, missä käyttötilanteessa mittaus suoritetaan. Esimerkiksi keskitetyllä koneellisella poistoilmanvaihdolla varusteissa asuinkerrostaloissa ilmanvaihdon kello-ohjattu ns. tehostus ja puolitus vaikuttavat paine-eroihin merkittävästi.

Kun yritetään määrittää ilmanvaihdon tuottama sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero, sekä tuuli- että rakennuksen käyttäjien toiminta (ulko-ovien ja tuuletusikkunoiden aukominen ym.) aiheuttavat mittaustulokseen vaihtelua, joka voidaan tulkita mittausrvirheeksi.

Mikäli mittaustuloksissa havaitaan suurta vaihtelua, mittaukset on syytä toteuttaa seurantamittauksena. Hetkellinen paine-eromittaus toimii parhaiten mitattaessa rakennuksen sisäisiä paine-eroja, joihin tuuli vaikuttaa huomattavasti vähemmän kuin sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon.

Hetkellisen mittauksen avulla voidaan paikantaa tilat, joissa on liian suuri epätasapaino tulo- ja poistoilma-
virtojen välillä.

4.1.2 Vaatimukset mittalaitteille

Mitattavat paine-erot ovat pieniä eikä ennalta ole tiedossa, onko mitattava tila yli- vai alipaineinen. Hetkelliseen paine-eromittaukseen käytettävän mittalaitteen mittausalueen tulee täyttää seuraavat vaatimukset

- paine-eron mittausalue vähintään -50...+50 Pa
- lukematarkkuus vähintään 1 Pa (0,1 Pa suositeltava)
- mittausrvirhe pienillä (-10...+10 Pa) paine-eroilla enintään ± 1 Pa

Huom. digitaalisella näytöllä varustettujen paine-eromittarien mittausepäätarkkuus ilmoitetaan joskus prosentteina a) mitatusta arvosta tai b) mittausalueesta, minkä lisäksi virherajaan pitää yleensä lisätä laitteen lukematarkkuutta vastaava vakiotermi.

Esimerkki A: Jos mitattava paine-ero on 10 Pa, laitteen lukematarkkuus 0,1 Pa ja suhteellinen mittausrvirhe 5 % mitattavasta paine-erosta, niin virheraja on tässä tilanteessa $0,05 \times 10 \text{ Pa} + 0,1 \text{ Pa} = 0,6 \text{ Pa}$. Laite täyttää mittaustarkkuutta koskevan vaatimuksen.

Esimerkki B: Mittalaitteen käyttämä paine-eron yksikkö on hPa. Mitattava paine-ero on 10 Pa (0,10 hPa), käytössä oleva mittausalue +2...-2 hPa, lukemataarkkuus 0,01 hPa, mittausvirhe 0,5 % mit-tausalueesta (0,005×4 hPa) + 0,01 hPa. Virherajaksi tulee kokonaisuudessaan 0,03 hPa eli 3 Pa. Laite ei täytä mittatarkkuutta koskevaa vaatimusta.

Vihje: Paine-eron mittausalue saa olla laajempikin kuin -50...+50 Pa ja yli 10 Pa paine-eroja mitattaessa voidaan sallia suurempi kuin 1 Pa mittausepätaarkkuus. Hetkellisissä paine-eromittauksissa käytettäväksi mittalaitteeksi kannattaa valita malli, joka pystyy mittaamaan useiden satojen pascalien paine-eroja, jol-loin samaa laitetta voidaan käyttää myös ilmanvaihdon pääte- ja säätölaitteiden mittausyhteistä tehtäviin mittauksiin. Mittausyhteistä tehtävissä mittauksissa paine-eron suunta on ennalta tiedossa eikä mittaus-alueen tarvitse olla 0-pisteen suhteen symmetrinen, vaan se voi olla esimerkiksi -100...+1000 Pa tai 0...+1000 Pa.

Mittalaite varustetaan paine-eron mittaukseen käytettävällä letkulla, johon liitetään ilmatiiviisti ohut ja jäykkäseinämäinen putki, jota tarvitaan mitattaessa paine-eroa ikkuna- tai oviaukon kautta. Tällöin ohut putki johdetaan tilasta ulos tiivisteraon kautta. Läpiviennissä voidaan käyttää esimerkiksi Ø2,0/1,0 mm (ulko/sisämitta) kuparikapillaariputkea tai ohutta pneumatiikkaputkea.

Paine-eron mittausletku liitetään mittarin miinus- tai referenssiliittimeen ja ylipaineen mittaukseen tarkoi-tettu (merkintänä +) tarkoitettu liitin jätetään tyhjäksi. Tällöin positiivinen mittaustulos ilmaisee tilan ole-van ylipaineinen ja negatiivinen alipaineinen ulkoilmaan verrattuna.

Mikäli paine-eromittarin lukema vaihtelee merkittävästi, kirjataan ylös vaihteluväli (min/max) sekä arvoitu keskiarvo. Mittauksen aikana voidaan käyttää mittalaitteen lukeman vaihtelua vähentäviä toimintoja.

4.1.3 Mittauksen suoritus

4.1.3.1 Yksittäisen huonetilan ja ulkoilman välisen paine-eron suora mittaus

Huonetilan ja ulkoilman välinen paine-ero mitataan noin 1 m korkeudelta lattiapinnasta. Mittaus on yleensä helpointa suorittaa johtamalla paine-eron mittausletku ulos tuuletusikkunan tai oven alanurkasta kuvien 5-7 mukaisesti. Mittauksen aikana kaikkien ikkunoiden tulee olla suljettuina.



Kuvat 5-7. Mittausletkun päähän tiiviisti liitetty ohut kuparikapillaariputki (kuva 5) tai jäykkäseinämäinen putki (pneumatiikkaputki kuvassa 6) on helpointa sijoittaa tuuletusikkunan tai oven alanurkkaan. Ikkuna tai ovi suljetaan mittauksen ajaksi (kuva 7).

Jos paine-eron mittausletkun läpiviennin korkeusasema poikkeaa 1,0 m tavoitearvosta enemmän kuin 0,3 m, voi olla tarpeen korjata mittaustulos vastaamaan paine-eroa 1,0 m korkeudella.

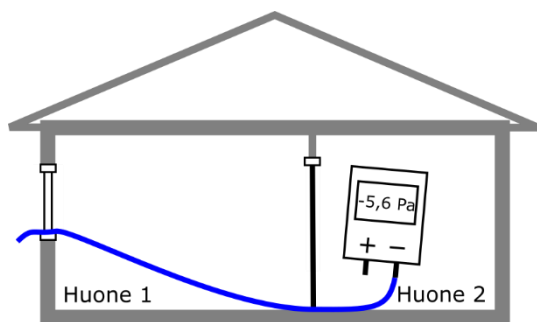
Jos mitattava tila on varustettu tiiviillä väliseinillä ja -ovilla, mittaaajan on päätettävä ja kirjattava ylös, missä tilanteessa mittaus suoritetaan

- a) normaali käyttötilanne, väliovent ovat joko auki tai kiinni (tieto tilan käyttäjiltä)
- b) väliovent suljetaan mittauksen ajaksi
- c) väliovent avataan mittauksen ajaksi

Yleisparitevin tapa on toistaa mittaus sekä väliovent ollessa auki että kiinni.

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron välistä mittausta ei ole suositeltavaa suorittaa kylmän (ulkolämpötila alle -15 °C) tai tuulisen (keskinopeus yli 6 m/s, puuskat yli 10 m/s) sään vallitessa ellei tarkoitus nimennomaan ole selvittää ääriolojen vaikutusta.

Jos mitattavassa tilassa ei ole avattavaa ikkunaa tai muuta reittiä paine-eron mittausletkun johtamiseksi ulos, letku voidaan johtaa ulos myös toisen huonetilan kautta kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Paine-eron mittausletku voidaan johtaa ulos myös toisen huonetilan kautta.

4.1.3.2 Kahden huonetilan välisen paine-eron mittaus

Kahden huonetilan välinen paine-ero voidaan yleensä mitata johtamalla mittausletku tilasta toiseen ovi-raon tai oven tiivisteraon kautta. Jos tilojen välillä ei ole ovea, on tarpeen joko porata läpivientireikä väli-seinään tai johtaa pitkä mittausletku tilasta toiseen esimerkiksi käytävän kautta. Mittauksen aikana tilojen välisten ovien tulee olla suljettuina.

Mittausletkun läpiviennin korkeusasemaa ei tarvitse huomioida, ellei tilojen välillä ole suurta lämpötila-eroa.

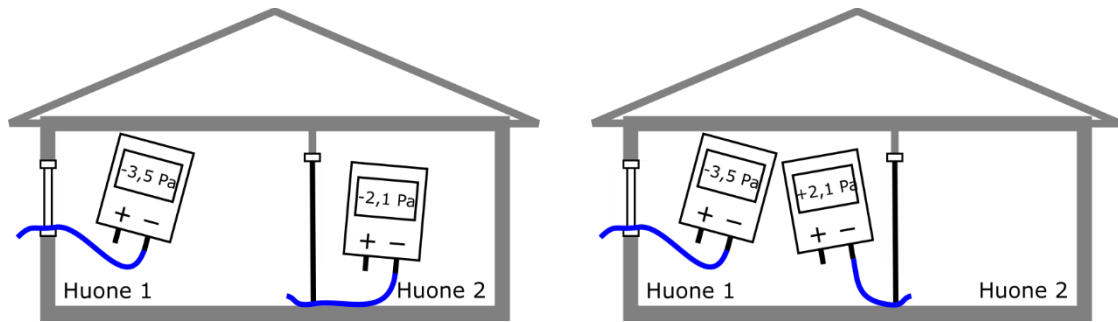
Mittaajan tulee huomioida oma sijaintinsa. Kun paine-eron mittausletku on liitettyä mittalaitteen miinus-liitimeen, positiivinen mittausulos ilmaisee, että mittalaite ja mittaja itse ovat tilassa, joka on ylipainei-nen verrattuna tilaan, johon mittausletku johtaa.

Sään vaikutus tilojen välisiin paine-eroihin on yleensä pieni.

4.1.3.3 Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron epäsuora mittaus

Epäsuoraa mittausta käytetään, kun halutaan mitata sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero, mutta tilassa ei ole avattavissa olevia, ulkoilmaan avautuvia, ikkunoita tai ovia (ei lainkaan ikkunoita tai kiinteät ikku-nat).

Epäsuorassa mittauksessa mitataan tutkittavan tilan ja sen viereisen tilan tai käytävän välinen paine-ero sekä viereisen tilan tai käytävän ja ulkoilman välinen paine-ero. Tutkittavan tilan paine-ero ulkoilmaan verrattuna on näiden kahden mittaus tuloksen summa tai erotus riippuen siitä, miltä puolelta tilojen väli-nen paine-ero mitataan.



Kuvat 9 ja 10. Paine-eron epäsuora mittaus.

Kuvan 9 (vasemmanpuoleinen kuva) tapauksessa huoneen 2 ja ulkoilman paine-ero on kahden mittauksen summa. Kuvan 10 tapauksessa mitataan huoneen 1 ylipainetta huoneeseen 2 verrattuna, joten huoneen 2 paine-ero ulkoilmaan verrattuna lasketaan mittaustulosten erotuksena.

4.1.3.4 Koko rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaus

Pyrittäessä määrittämään koko rakennuksen tai ilmanvaihdon palvelualueen (keskimääräinen) paine-ero ulkoilmaan verrattuna, mittaus suoritetaan kahdelta eri julkisivulta. Jos mittauksia tehdään tiiviillä välivoilla varustetuista huonetiloista, väliovet pidetään mittauksen aikana auki.

Jos rakennuksessa on enemmän kuin 1 kerros, sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on kylmällä säällä (terminen lämpötilaero yli 1 Pa/m) suositeltavaa mitata sekä alimmasta että ylimmästä kerroksesta, kahdelta julkisivulta (2+2 mittausta). Korkeissa rakennuksissa on suositeltavaa mitata myös porrashuoneiden ja ulkoilman välinen paine-ero sekä porrashuoneen ja sisätilojen paine-ero.

Porrashuoneen yläosasta mitattaessa on kirjattava ylös myös mittauskorkeus, joka voidaan määrittää joko suhteessa porrashuoneen alimpaan tasoon tai rakennuksen ylimmän kerroksen lattian tasoon.

Jos rakennus jakautuu useaan lohkoon, joilla on erilliset ilmanvaihtokoneet ja joiden väliset ovet (yleensä palo-ovet) ovat normaalisti suljettuina, on suositeltavaa mitata paine-ero lohkoittain. Tämä voidaan toteuttaa kahdella tapaa:

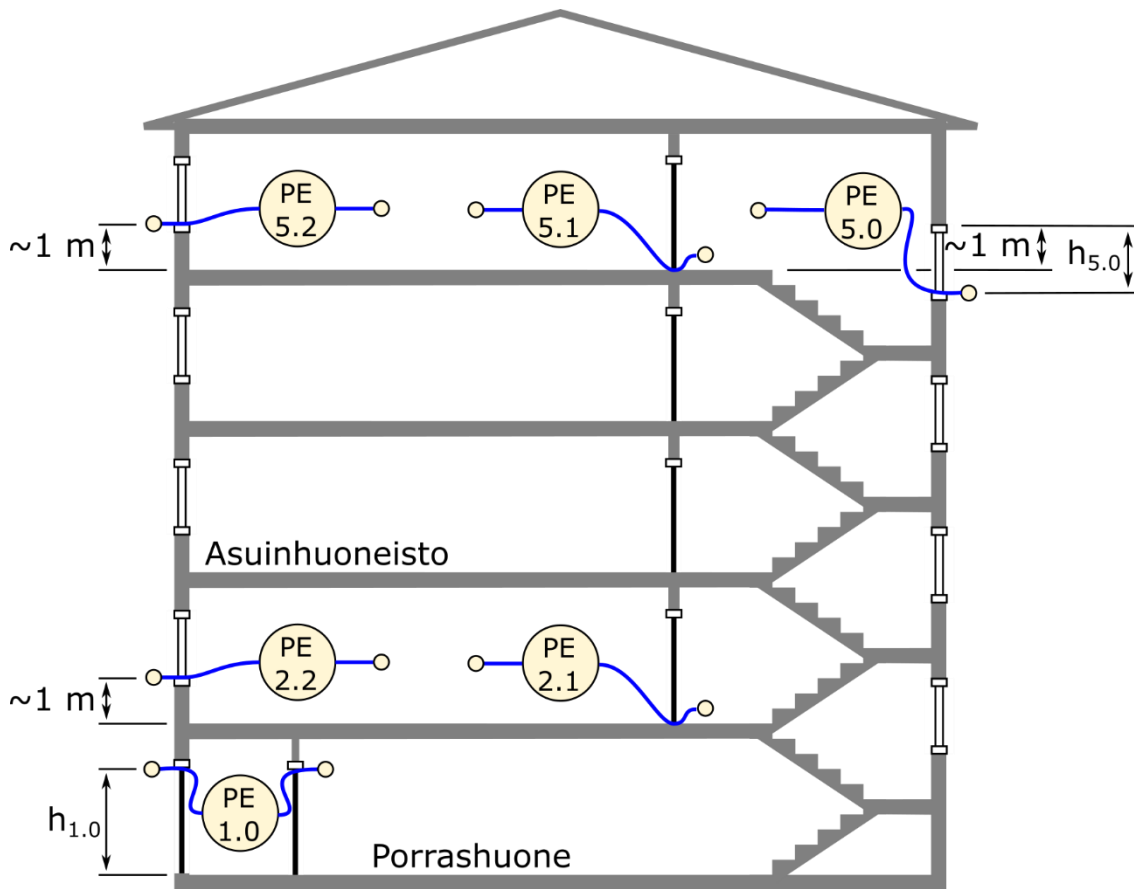
- Joka lohkossa mitataan sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero (miel. 2 eri julkisivulta tehtävää mittausta)
- Yksi lohkoista valitaan referenssiksi, jonka sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero mitataan mahdollisimman tarkasti. Muiden lohkojen paine-ero määritetään mittaamalla niiden ja referenssilohkon välinen paine-ero.

Referenssimenetelmä (b) sopii suuriin rakennuksiin, jossa on laaja keskusaula tai porrashuone, josta on kulkuyhteys muihin tiloihin. Menetelmää käytettäessä referenssilohkon ja ulkoilman välinen paine-ero on määritettävä mahdollisimman tarkasti – paras tapa on määrittää referenssilohkon ja ulkoilman paine-ero seurantamittauksella.

Asuinrakennuksissa jokainen huoneisto voidaan käsittää erilliseksi lohkoksi. Huoneistojen sisällä välivoilla on lähes aina oviraot eikä yksittäisten huoneiden välille pääse muodostumaan merkittäviä paine-eroja. Pientaloissa mittaus tehdään (vähintään) kahdelta julkisivulta.

Kerrostaloissa on kylmällä säällä suositeltavaa mitata vähintään yhden alimmassa ja yhden ylimmässä kerroksessa sijaitsevan asuinhuoneiston paine-ero ulkoilmaan ja porrashuoneeseen verrattuna. Porrashuoneen paine-ero ulkoilmaan verrattuna mitataan, mikäli mahdollista, porrashuoneen ala- ja yläosasta

kuvan 11 mukaisesti. Asuinhuoneistoissa mitataan aina sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero sekä huoneiston ja porrashuoneen välinen paine-ero.



Kuva 11. Mittauspisteet määritettäessä asuinkerrostalon sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa.

Pienissä huoneistoissa ikkunoita on yleensä vain yhdellä julkisivulla, joten mittaus kahdelta julkisivulta on näissä mahdoton. Mikäli huoneistossa on eri ilmansuuntiin avautuvia ikkunoita, mittaus on etenkin tuulisella säällä suositeltavaa tehdä kahdelta eri julkisivulta. Paine-ero voidaan mitata myös lasitetun parvekkeen taustaseinältä, koska lasitus ei ole ilmatiivis.

Haluttaessa mahdollisimman kattava tieto rakennuksen painesuhteista, on syytä valita mittaukseen sekä pieniä että suuria huoneistoja.

4.2 Termisen paine-eron kompensointi

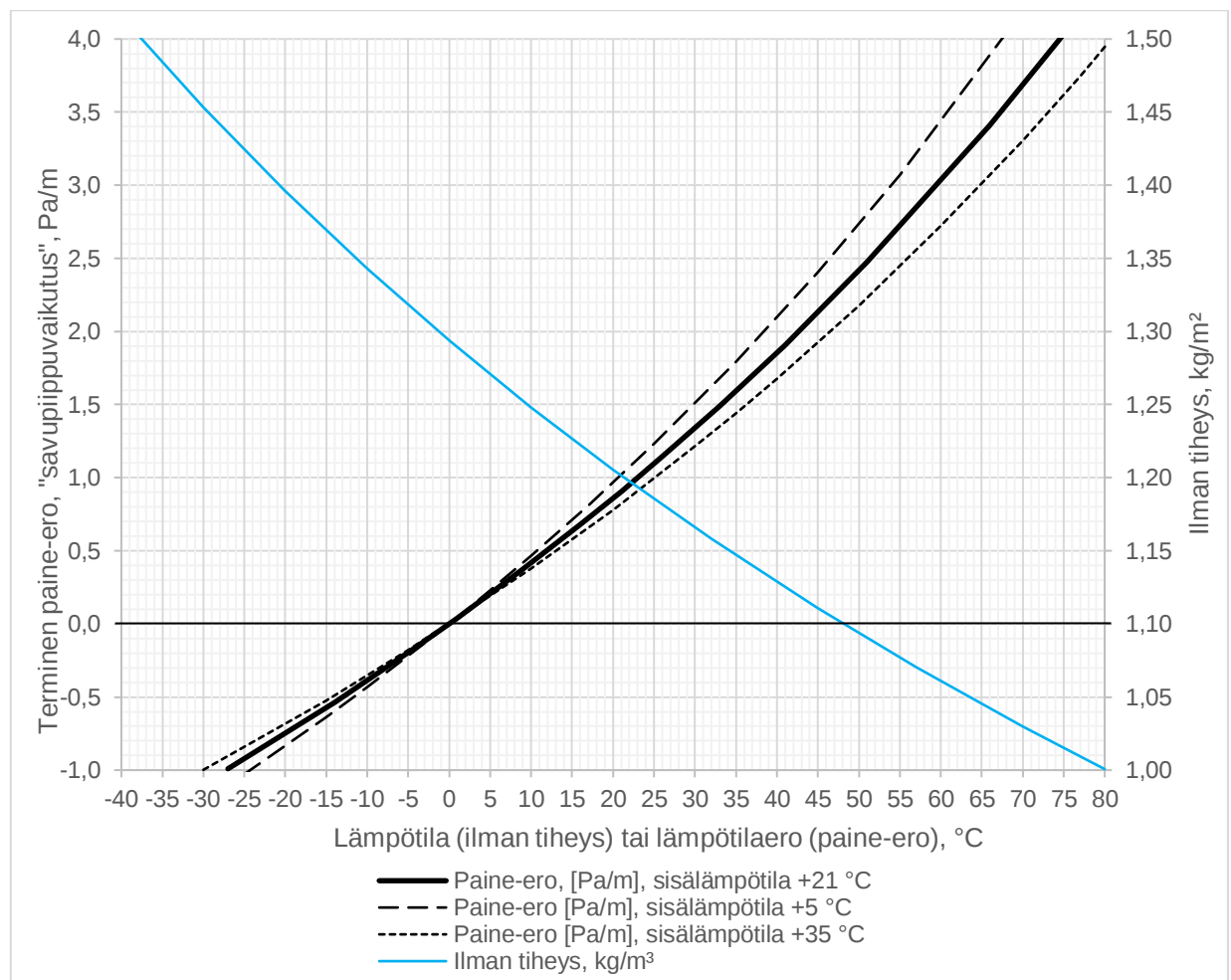
Jos paine-eron mittausletkun läpiviennin korkeusasema poikkeaa 1,0 m tavoitearvosta enemmän kuin 0,3 m, voi olla tarpeen korjata mittaustulos vastaamaan paine-eroa 1,0 m korkeudella. Korjauksen suorittamiseksi pitää kirjata muistiin läpiviennin korkeusasema joko ao. kerroksen lattiatasosta tai alimman kerroksen lattian tasosta mitattuna 0,1 m tarkkuudella.

- jos läpiviennin korkeusasema on 0,0–2,0 m lattiasta (-1,0...+1,0 m referenssitason verrattuna) ja sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on alle 10 °C, korjausta ei tarvita
- jos läpiviennin korkeusasema poikkeaa 1,0 m referenssitasosta enemmän kuin 1 m, pitää korkeusasema aina kirjata ja mittaustulos korjata vastaamaan paine-eroa 1,0 m korkeudella, mikäli sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on yli 5 °C

Korjaus tehdään määrittämällä terminen paine-ero [Pa/m], joka riippuu sisä- ja ulkoilman tiheydestä. Kertamittauksia suoritettaessa terminen paine-ero voidaan määrittää kuvan 12 avulla, kun sisä- ja ulkoilman lämpötila tiedetään.

Seurantamittauksia tehtäessä lämpötilaero ei ole vakio, joten terminen paine-ero pitää määrittää laskennallisesti, mitatun ulkolämpötilan perusteella. Ulkolämpötilana voidaan käyttää kohteesta mitattua lämpötilaa tai lähimmän sääaseman mittaustietoja silloin, kun vähintään tunnitaiset lämpötila-arvot ovat käytettävissä.

Sisälämpötila voidaan yleensä olettaa vakioksi. Mikäli sisälämpötilakin vaihtelee merkittävästi, tulee se mitata lämpötilaloggerilla.



Kuva 12. Ilman tiheys ja terminen paine-ero.

Paine-eron korjaus lasketaan seuraavasti

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

missä	$\Delta p_{mitattu}$	mitattu paine-ero [Pa]
	$\Delta p_{korjattu}$	laskennallisesti määritetty paine-ero 1,0 m korkeudella lattiasta [Pa]
	$\frac{\Delta p}{\Delta h}$	terminen paine-ero [Pa/m]
	h_0	paine-eron referenssitason korkeusasema [m]
	h_1	mittauskorkeus (läpiviennin korkeusasema) [m]

Kaavan 2 avulla on mahdollista määrittää sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero myös 1,0 m referenssitasosta poikkeavalla korkeudella, esimerkiksi liikuntasalin katonrajassa. Tällöin muuttujaan h_o sijoitetaan korkeusasema, jolla paine-ero halutaan tietää.

4.3 Seurantamittaus

4.3.1 Käyttötarkoitus

Seurantamittauksella tarkoitetaan tallentavalla mittalaitteella tehtävää mittauksia. Seurantamittauksen suositeltu kesto on 1–2 viikkoa ja mittauksen tulisi ulottua viikonlopun yli.

Seurantamittauksen avulla voidaan määrittää

- koko mittausjakson keskimääräinen paine-ero
- erikseen ilmanvaihdon aiheuttama käyttöajan ja käyttöajan ulkopuolisen ajan paine-ero (yleensä paine-ero tuloilmakoneiden käynti- ja seisonta-aikoina)
- sääolojen ja rakennuksen käytön vaikutus
- ilmanvaihtokoneiden käyntiajat (jos ilmanvaihtokoneet vaikuttava paine-eroon)
- ilmanvaihdon säätöautomaation toiminta

Seurantamittauksella voidaan selvittää rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron vaihtelu normaalin käytön aikana. Tulosten tulkintaa saattaa silti haitata se, ettei tiedetä tarkasti, miten ilmanvaihtolaitteita on mittauksen aikana ohjattu tai ovatko välivet olleet auki tai kiinni. Mikäli tarvitaan tarkka tieto paine-erosta eri käyttötilanteissa, varmin tapa on ohjata ilmavaihto käsikäytöllä haluttuun toimintatilaan normaalin käyttöajan ulkopuolella.

4.3.2 Vaatimukset mittalaitteille

Seurantamittauksessa käytettävien mittalaitteiden, ns. paine-erologgerien, mittauksaluetta koskevat samat vaatimukset kuin hetkellisen paine-eron mittalaitteita (mittausalue vähintään -50...+50 Pa, virhe -10...+10 Pa alueella enintään 1 Pa).

Mittalaitteen tulee kyetä mittaamaan ja tallentamaan mitattava paine-ero 1 minuutin välein vähintään 1 viikon ajanjaksolta (noin 10 000 näytettä). Tiedot voidaan tallentaa mittalaitteen sisäiseen muistiin, erilliseen tallennusyksikköön tai pilvipalvelimelle.

4.3.3 Mittauksen suoritus

4.3.3.1 Yksittäisen huonetilan ja ulkoilman välisen paine-eron suora mittaus

Yksittäisen huoneen ja ulkoilman välisen paine-eron seurantamittauksessa paine-erologgeri asennetaan huoneeseen ja mittausletku johdetaan ulos kuten mitattaessa hetkellistä paine-eroa, ks. kuvat 5-7. Mittausletku on asennettava niin, ettei letkuun pääse kertymään sade- tai kondenssivettä. Letkun päässä voidaan käyttää vesityksellä varustettua suojarasiaa tai ns. tuulisuoja.

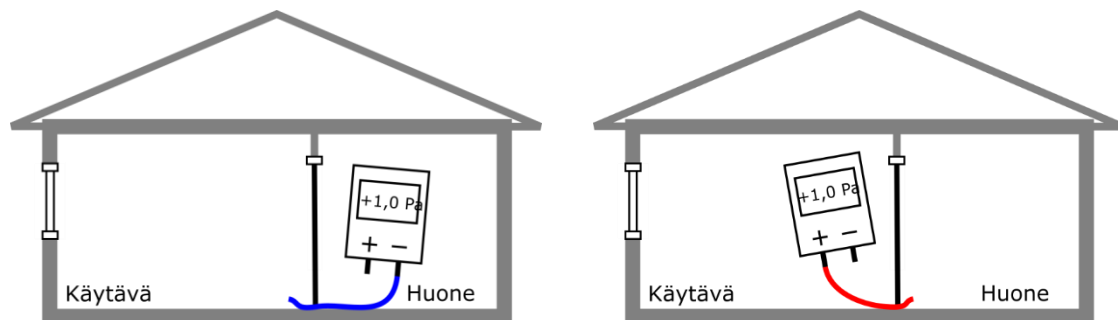
Jos mitattavassa tilassa ei ole avattavia ikkunoita tai muuta reittiä mittausletkun johtamiseksi ulos, mittausletku voidaan johtaa ulos seinään porattavan reiän tai muiden huonetilojen kautta. Pitkissä mittauslinjoissa ei pidä käyttää pehmeäseinämäistä letkua, esimerkiksi silikoniletkua, koska muiden tilojen paineenvaihtelu voi tällöin vaikuttaa mittaustulokseen. Jäykkäseinämäinen PCV-muoviletku on edullinen ratkaisu.

4.3.3.2 Kahden huonetilan välisen paine-eron mittaus

Kahden huonetilan välinen paine-ero voidaan yleensä mitata johtamalla mittausletku tilasta toiseen oven tiivisteraon tai seinään porattavan reiän kautta. Mittausletkun läpiviennin korkeusasemaa ei tarvitse huomioida, ellei tilojen välillä ole suurta lämpötilaeroa.

Mittaajan tulee huomioida, kumpaan tilaan paine-erologgeri on asennettu. Kun paine-eron mittausletku on liitetty paine-erologgerin miinusliittimeen, positiivinen mittaustulos ilmaisee, että mittalaite on tilassa, joka on ylipaineinen verrattuna tilaan, johon mittausletku johtaa.

Huonetilojen paine-ero käytävä- ja aulatiloihin verrattuna ilmoitetaan siten, että positiivinen arvo ilmaisee huoneen olevan ylipaineinen käytävään tai aulaan verrattuna. Tämä toteutuu, kun mittalaite asennetaan kuvan 13 mukaisesti mitattavaan huoneeseen ja paine-eron mittausletku on liitetty mittalaitteen – tai 0 -liittimeen. Jos mittalaite joudutaan sijoittamaan käytävälle, oikeanlainen mittaustulos saadaan liittämällä mittausletku mittalaitteen + -liittimeen kuvan 14 mukaisesti.



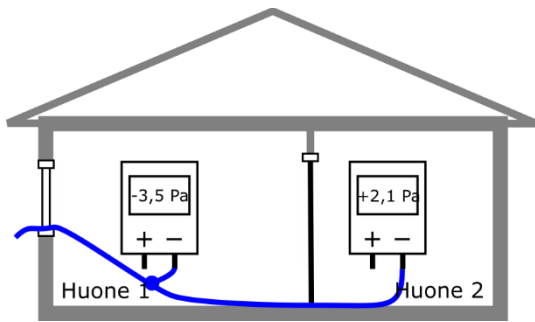
Kuvat 13 ja 14. Huonetilan ja käytävän välisen paine-eron mittaus.

Periaatteessa kahden huonetilan välinen paine-ero voidaan määrittää myös molemmista huoneista mitattujen sisä- ja ulkoilman paine-erojen erotuksena. Näin toimittaessa tuuli aiheuttaa mittaustulokseen suurta vaihtelua ja menetelmä toimii vain tyyneellä säällä.

4.3.3.3 Referenssilinjaan perustuva mittaus

Referenssilinja tarkoittaa useaa samaan paine-eron mittausletkuun liitettyä paine-eromittaria. Referenssilinjaa on järkevää käyttää näissä tilanteissa.

1. Paine-eroa halutaan mitata ikkunattomista kellaritiloista tai muista tiloista, joista on vaikeaa johtaa tilakohtaisia paine-eron mittausletkuja ulos. Referenssilinjaa käytettäessä riittää yhden mittausletkun johtaminen ulos.
2. Halutaan vähentää tuulen vaikutusta mittaustuloksiin. Tässä tapauksessa referenssilinja johdetaan ulos mahdollisimman tuulensuojaisessa paikassa.
3. Halutaan mitata huonetilojen välisiä paine-eroja.

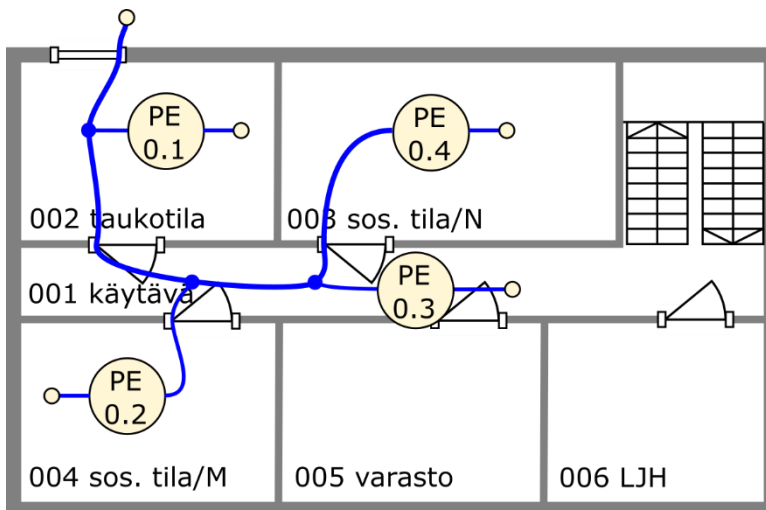


Kuva 15. Referenssilinjan toteutusperiaate. Useita paine-eromittareita yhdistetään samaan mittausletkuun.

Kuvassa 15 on esitetty, miten kahden huonetilan ja ulkoilman välinen paine-ero voidaan mitata käyttämällä yhtä ulkoilmaan johdettua mittausletkua, ns. referenssilinjaa. Tätä mittausmenetelmää käytettäessä tuuli vaikuttaa yhtenevästi molempiin paine-eromittauksiin, joten sen avulla voidaan määrittää myös huoneiden 1 ja 2 välinen paine-ero.

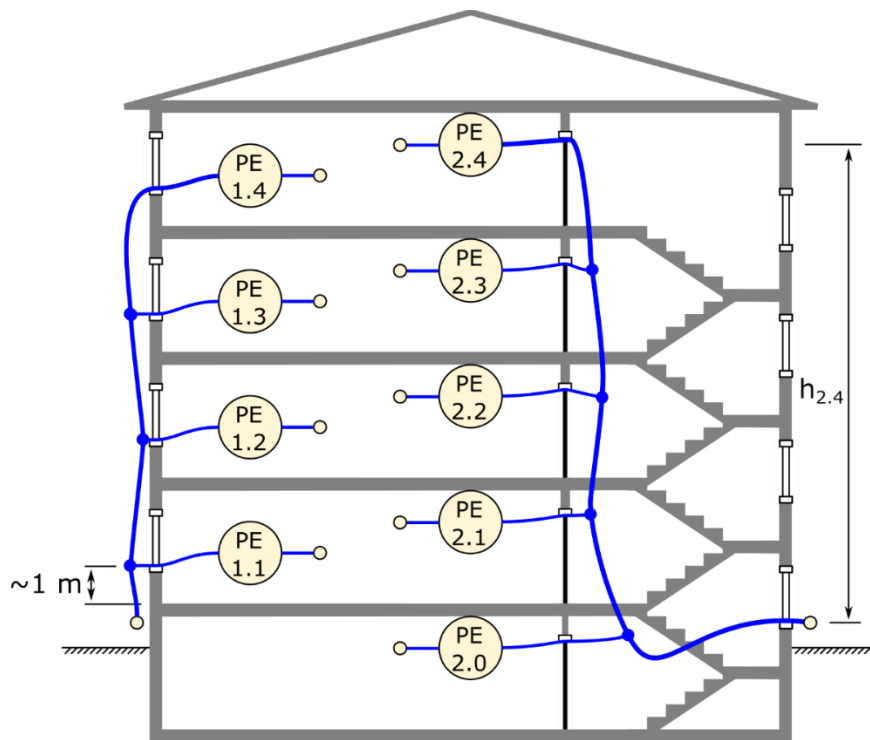
Referenssilinja tulee tehdä jäykkäseinämäisestä putkesta tai letkusta, jonka sisäläpimitta on vähintään 6 mm. Tähän käyttöön sopiva ja edullinen materiaali on esimerkiksi Ø6/9 mm (sisä/ulkomitta) tai Ø8/12 mm vahvikkeeton PVC-muoviletku. Referenssilinjan haaroitukset paine-eromittareille pitää toteuttaa ao. letkulle tarkoitetuilla haaroitusliittimillä. Liitoksia ei saa tiivistää teippaamalla. Liitin on väärän kokoinen, mikäli letku ei pysy paikoillaan liittimessä ilman teippiä. Teippauksen alle voi jäädä ilmavuoto, joka vääristää mittaustuloksia.

Kuvassa 16 on esitetty, miten samaan referenssilinjaa voidaan yhdistää suurempikin määrä paine-eromittareita. Kuvien 15 ja 16 tapauksessa referenssilinja on vaakasuuntainen, koska kaikki paine-eromittarit sijaitsevat samassa kerroksessa.



Kuva 14. Esimerkki vaakasuuntaisen referenssilinjan toteutuksesta.

Referenssilinjaan voidaan liittää myös eri kerroksissa sijaitsevia tiloja. Tämä on järkevää, jos mittauslinjaa ei saada johdettua ulos kellarikerroksesta tai halutaan mitata eri kerrosten välistä paine-eroa. Tällainen *pystysuuntainen referenssilinja* voidaan johtaa kerroksesta toiseen joko rakennuksen sisällä tai ulkoseinällä kuvan 17 mukaisesti.



Kuva 17. Esimerkki pystysuuntaisen referenssilinjan toteutuksesta.

Kuvassa 17 paine-eromittarit PE 1.1–1.4 on liitetty pystysuuntaiseen referenssilinjaan, joka on sijoitettu rakennuksen ulkopuolelle. Tätä mittausmenetelmää käytettäessä referenssilinjan lämpötila on sama kuin ulkoilman lämpötila, jolloin referenssilinjassa ei synny termistä paine-eroa. Paine-eromittausten tuloksia ei tarvitse korjata, mikäli ulkoseinän läpiviennit sijaitsevat $1,0 \pm 0,3$ m korkeudella lattiasta.

Ulkoseinälle sijoitettava referenssilinja pitää sijoittaa siten, ettei auringon säteily lämmitä sitä.

Kuvassa 17 paine-eromittarit PE 2.0–2.4 on liitetty rakennuksen sisälle, porrashuoneeseen, sijoitettuun pystysuuntaiseen referenssilinjaan. Referenssilinjan lämpötila poikkeaa ulkoilman lämpötilasta, joten referenssilinjassa vaikuttava termien paine-ero pitää huomioida mittaustuloksissa.

Kuvassa 17 on esitetty paine-eromittarin PE 2.4 ja mittauslinjan ulkoseinän läpiviennin välisen korkeuseron määrittäminen. Termisen paine-eron korjausyhtälöä 2 käytettäessä on tässä tapauksessa helppointa käyttää kellarikerroksen lattiaa nollatasona, jolloin h_0 on 4.kerroksen lattian korkeusasema $+1,0$ m ja h_1 on mittausletkun läpiviennin korkeusasema.

4.3.3.4 Koko rakennuksen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaus

Pyrittäessä määrittämään koko rakennuksen (keskimääräinen) paine-ero ulkoilmaan verrattuna, mittaus on suositeltavaa toteuttaa samanaikaisesti kahdelta eri julkisivulta. Jos rakennuksessa on enemmän kuin 1 kerros, paine-ero on suositeltavaa mitata alimmasta ja ylimmästä kerroksesta, kahdelta julkisivulta (2+2 mittausta), mikäli mittaus toteutetaan kylmällä säällä tai termien paine-ero on yli 1 Pa/m.

Korkeissa rakennuksissa on suositeltavaa mitata myös porrashuoneiden ja ulkoilman välinen paine-ero sekä porrashuoneen ja sisätilojen paine-ero vähintään hetkellisenä mittauksena. Korkeiksi rakennuksiksi lasketaan vähintään 15 m korkuiset rakennukset, esimerkiksi 5 kerroksiset asuin- ja toimistorakennukset.

Jos rakennus jakautuu useaan vyöhykkeeseen, joiden väliset ovet (yleensä palo-ovet) ovat tiiviit ja normaalisti suljettuina, joka vyöhykkeen painesuhteet pitää selvittää. Tämä voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla:

1. Joka vyöhykkeen sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero mitataan erikseen (miel. 2 eri julkisivuilta tehtävää mittausta).
2. Rakennukseen asennetaan usealle vyöhykkeelle yhteinen paine-eron mittauslinja (referenssilinja). Tätä menetelmää käytettäessä riittää yksi paine-erologgeri vyöhykettä kohti. Referenssilinja pitää johtaa ulkoilmaan mahdollisimman tuulensuojaisassa paikassa.

Jos referenssilinja johdetaan rakennuksen sisällä kerroksesta toiseen, mittaustuloksia analysoitaessa on huomioitava referenssilinjaan muodostuva paine-ero. Tämän määrittämiseksi tarvitaan tieto sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta. Paras tapa on mitata molemmat lämpötilat tallentavilla lämpötilamittareilla (lämpötilaloggeri), mutta yleensä riittävään tarkkuuteen päästään myös käyttämällä huonelämpötilan asetusarvoa ja lähimmän sääaseman mittautietoja.

4.3.3.5 Mittaus ilmanvaihdon päätelaitteista tai ilmavirran mittausyhteistä

Seurantamittausta voidaan käyttää myös ilmanvaihdon käyntiaikojen tai ilmavirtasäädön toiminnan selvittämiseen. Tällöin paine-eromittarilla mitataan ilmanvaihtokanavan yli- tai alipainetta huonetilaan verrattuna. Mittauksessa voidaan hyödyntää päätelaitteiden tai ilmavirran säätö- ja mittausosien (kanaviston säätöpellit, iv-koneiden ilmavirran mittausosat) valmiita mittausyhteitä.

Kanavasta tai ilmavirran mittausosasta tehtävällä paine-eromittauksella voidaan määrittää tarkasti ja luotettavasti ilmanvaihdon käyntiajat myös niissä tiloissa, joiden ilmanvaihto ei merkittävästi vaikuta sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon. Ilmavirran mittausyhteistä tehtävällä mittauksella on myös mahdollista määrittää tilan tai vyöhykkeen tulo- tai poistoilmavirta.

Pelkästään käyntiaikoja selvitettäessä riittää, että paine-erologgeri liitetään kanavaan tai päätelaitteeseen siten, että syntyy mitattava paine-ero. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi työntämällä paine-eron mittausletku päätelaitteen sisälle.

Ilmavirtaa [l/s] määritettäessä paine-erologgeri tulee liittää mittausyhteisiin. Osassa päätelaitteita on vain yksi mittausyhde, jolloin loggerin toinen mittausliitin jätetään tyhjäksi. Jos mittausyhteitä on kaksi, molemmat tulee yhdistää paine-erologgerin + ja - liittimiin. Paine-eromittauksen lisäksi pitää selvittää päätelaitteen ns. k-arvo, jota tarvitaan ilman tilavuusvirran laskemiseksi.

Huom. Mitattava paine-ero voi olla suurempi kuin 50 Pa. Osassa paine-erologgereita mittausalue on mahdollista valita laajemmaksi.

4.4 Jatkuva mittaus

Uudisrakennukset ja tiivistyskorjatut rakennukset on suositeltavaa varustaa jatkuvatoimisella paine-eromittauksella. Mittausten avulla voidaan valvoa paine-eron pysyvyyttä ja niitä voidaan hyödyntää myös ilmavirtoja säädettäessä (tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainotus).

Ilmanvaihtokoneissa yleisesti käytettävät toiminnan valvontaratkaisut, kuten kanaviin asennettavat virtausvahdit, reagoivat vain suuriin muutoksiin ilmavirroissa. Näillä havaitaan esimerkiksi puhaltimen pysähtyminen katkenneiden kiilahihnojen vuoksi, mutta pienet muutokset ilmavirrassa jäävät havaitsematta. Paine-eroon vaikuttavia muutoksia, joita virtausvahdeilla ei havaita, aiheuttavat mm.

- suodattimien likaantuminen
- luistavat kiilahihnakäytöt
- yksittäisen palopellin laukeaminen
- ulko- tai jäteilmapeltien osittainen vikaantuminen (pelti ei aukea kokonaan)

Jatkuvatoimisille mittauksille on mahdollista asettaa hälytysrajat, jolloin huolto-organisaatiolle saadaan automaattisesti tieto mahdollisesta viasta. Hälytyksillä tulee olla riittävän pitkä viive (useita tunteja), jottei tuulenpaineen vaihtelu laukaise hälytystä aiheettomasti.

5 Lähteet

1. Suomen rakentamismääräyskokoelma D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto Määräykset ja ohjeet (1987 – 2012).
2. LVI 30-10085 Tiiviin pientalon ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluohje – Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän tuloilmapuolen suunnittelu. Rakennustietosäätiö 1987. 6 s. Peruttu 28.11.2012.
3. LVI 30-10086 Tiiviin pientalon ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluohje – koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän ulkoilman sisäänoton suunnittelu. Rakennustietosäätiö 1987. 4 s. Peruttu 28.11.2012.
4. Vinha Juha, Korpi Minna, Kalamees Targo, Eskola Lari, Palonen Jari, Kurnitski Jarek, Valovirta Ilkka, Mikkilä Antti. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatilavuus. Tutkimusraportti 131. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos 2005. s 102.
5. Vinha, Juha, Korpi, Minna, Kalamees, Targo, Jokisalo, Juha, Eskola, Lari, Palonen, Jari. Kurnitski Jarek, Aho, Hanna, Salminen, Mikko, Salminen, Kati, Keto, Matias. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tutkimusraportti 140. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
6. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Asetuksen voimaantulopäivä 1.1.2018. Ympäristöministeriö 2017.

Sään vaikutus

Ilman tiheys on kääntäen verrannollinen sen lämpötilaan

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R_u T} \quad (1)$$

missä ρ = ilman tiheys, kg/m³
 M = ilman moolimassa, 29 kg/kmol
 p = ilmanpaine, Pa
 R_u = yleinen kaasuvakio, 8315 J/(kmol·K)
 T = absoluuttinen lämpötila, K

Sisä- ja ulkoilman lämpötilojen poiketessa toisistaan myös ilman tiheys rakennuksen sisällä ja ulkona on erilainen. Koska sisäilman on yleensä ulkoilmaa lämpimämpää, sen tiheys on pienempi ja lämmin sisäilma pyrkii virtaamaan ulos rakennuksen yläosasta. Saman aikaan viileämpää ja tiheämpää ulkoilmaa pyrkii virtaamaan sisään rakennuksen alaosaan. Tiheyserosta johtuvan termisen paine-eron [Pa/m] suuruus on

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} = (\rho_u - \rho_s)g \quad (2)$$

missä ρ_u = ulkoilman tiheys, kg/m³
 ρ_s = sisäilman tiheys, kg/m³
 g = painovoiman kiihtyvyys, 9,81 m/s²

Ilman tiheyden riippuvuus lämpötilasta ja termisen paine-eron riippuvuus sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta on esitetty graafisesti kuvassa 12.

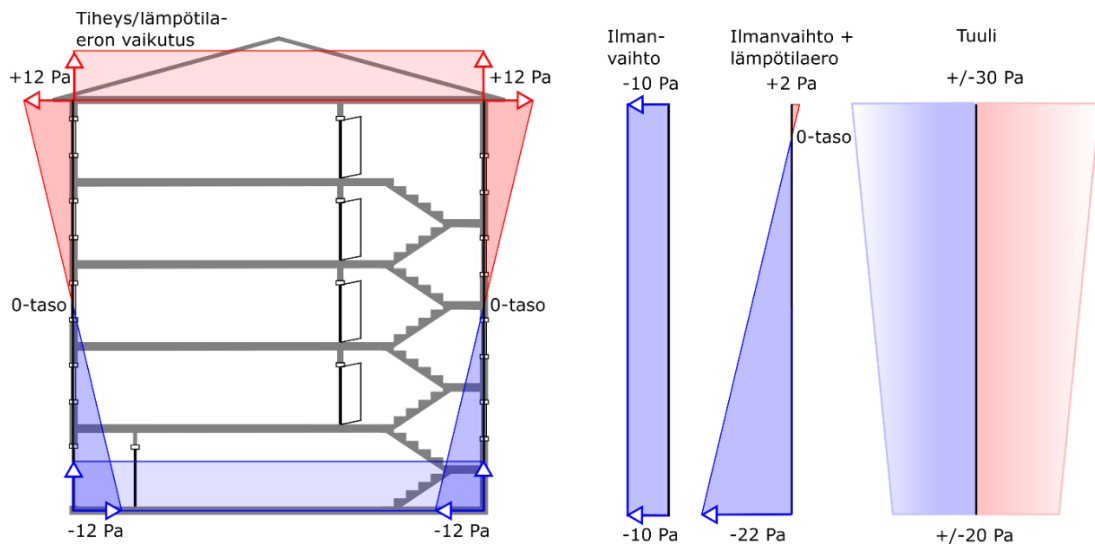
Termisen paine-eron lämpötilaeron vaikutuksesta rakennuksen yläosa on kylmällä säällä ylipaineinen ja alaosa alipaineinen ulkoilmaan verrattuna. Jos rakennuksessa ei ole ilmanvaihtoa eikä merkittäviä ilmastuotoja ja eri kerrokset ovat toisiinsa yhteydessä esimerkiksi avoimen portaikon kautta, paine-eron nollataso pitäisi asettua korkeussuunnassa rakennuksen puoliväliin kuvan 15 mukaisesti.

Jos ulkovaipassa on suuria vuotoreittejä, esimerkiksi avoin ikkuna, paine-eron nollataso siirtyy tätä vuotoreittiä kohti. Tästä syystä ulko-oven avaaminen johtaa kylmällä säällä ylipaineen kasvuun rakennuksen yläosassa.

Ilmanvaihtojärjestelmä, jonka poistoilmavirta on tuloilmavirtaa suurempi, siirtää paine-eron nollatasoa ylöspäin (alipaine rakennuksen alaosassa kasvaa ja ylipaine yläosassa pienenee), mutta korkeiden rakennusten yläosa voi tästä huolimatta pysyä ylipaineisena.

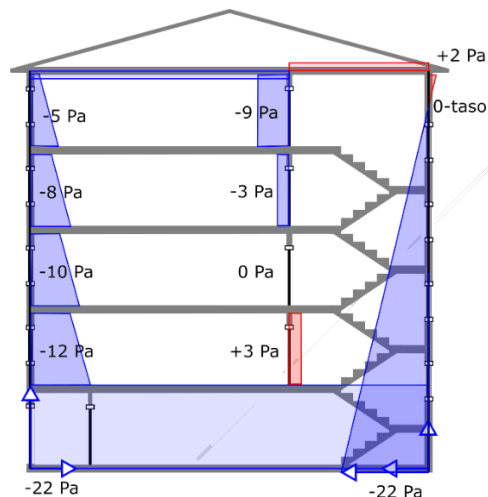
Ulkovaipan paine-eroon vaikuttaa myös tuulenpaine, joka on suurin avoimilla paikoilla ja rakennusten yläosassa.

Tulosten tulkinta



Kuva 1. Termisen paine-eron, ilmanvaihdon, tuulen ja lämpötila/tiheyseron yhteisvaikutus, teoreettinen malli.

Termisen paine-eron merkitys pienenee, jos eri kerrosten tilat eivät ole avoimessa yhteydessä toisiinsa. Kuvassa 2 on kuvan 1 asuinkerrostalo silloin, kun huoneistojen ja porrashuoneen väliset ovet ovat suljettuina. Koneellinen poistoilmanvaihto pyrkii alipaineistamaan kaikki huoneistot -10 Pa alipaineeseen ulkoilmaan verrattuna, mutta huoneiston ja porrashuoneen välinen paine-ero vaihtelee kerroksittain. Tämä vaikuttaa vuotoilmavirtauksiin rakennuksen sisätilojen välillä ja sitä kautta myös huoneiston paine-eroon ulkoilmaan verrattuna.



Kuva 2. Paine-erojen muodostuminen koneellisella poistoilmanvaihdolla varustetussa asuinkerrostalossa. Teoreettinen malli ilman tuulen vaikutusta.

Esimerkitapauksessa (kuva 2) alimman asuinkerroksen huoneisto on ylipaineinen porrashuoneeseen nähden, minkä seurauksena huoneistosta virtaa ilmaa porrashuoneeseen rakenteiden ja oven ilmapuoleittien kautta. Ulkoseinän korvausilmaventtiilien ilmavirta onkin tässä tilanteessa koneellisen poiston ilmavirta + porrashuoneeseen virtaava vuotoilmavirta, mikä seurauksena alipaine ulkoilmaan verrattuna kasvaa 10 Pa mitoitusarvoa suuremmaksi.

Kahden ylimmän kerroksen tilanne on päinvastainen. Porrashuoneesta virtaa ilmaa huoneistoon, joten ulkovaipan korvausilmavirta ja huoneiston alipaine ulkoilmaan verrattuna jäävät mitoitusarvoja pienemmiksi.

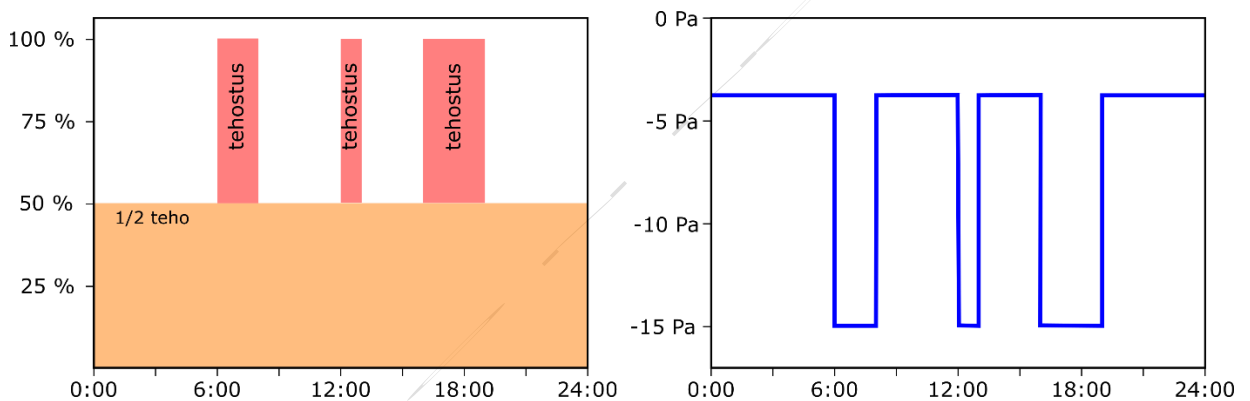
Ilmanvaihdon säätöjärjestelmien ja rakennuksen käytön vaikutus

Koneellinen poistoilmanvaihto

Koneellisella poistoilmanvaiholla varustetuissa rakennuksissa on usein käytössä kello-ohjattu ilmanvaihdon puolitus. Poistopuhaltimet ovat 2-nopeuksisia ja niitä käytetään enimmäkseen alemmalla kierrosnopeudella, jolloin poistoilmavirrat ovat noin 50 % suunnitellusta.

Ilmavirtauksen painehäviö kanavissa, päätelaitteissa tai ulkoseinällä sijaitsevista korvausilmaventtiileissä on verrannollinen tilavuusvirran neliöön. Kun ilmavirtaa pienennetään 50 %, sekä poistoilmaventtiilin painehäviö että korvausilmaventtiilin painehäviö alenee neljäsosaan 100 % ilmavirralla mitatusta painehäviöstä.

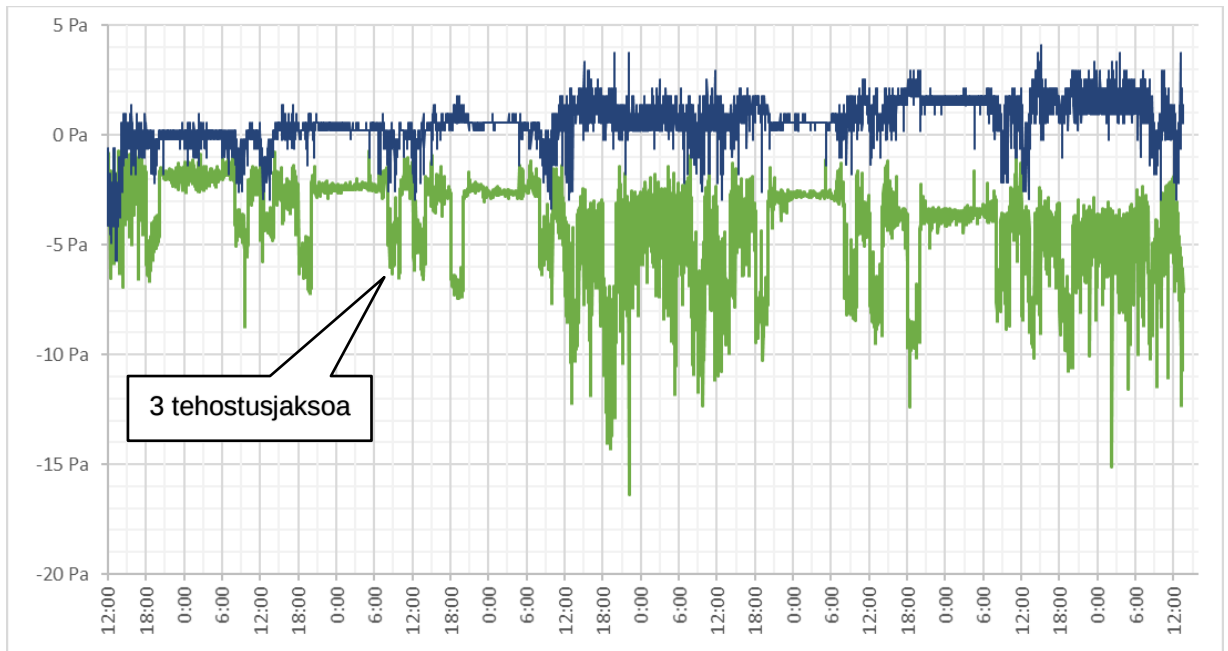
Kuvassa 18 on esitetty teoreettinen malli paine-eron vaihtelusta kerrostalohuoneistossa, jonka korvausilmaventtiilit on mitoitettu 15 Pa painehäviölle. Kaikki korvausilma saadaan näiden korvausilmaventtiilien kautta, joten huoneisto on -15 Pa alipaineinen ulkoilmaan verrattuna, kun ilmanvaihto toimii mitoitussilmavirrallaan (ns. tehostusjakso), tässä tapauksessa klo 6-8, 12-13 ja 16-19 (kuva 17). Puolitettulla ilmavirralla alipaineisuus pienenee neljäsosaan, tässä tapauksessa vajaaseen 4 pascaliin.



Kuvat 3 ja 4. Asuinkerrostalon kello-ohjatulla puolituksella varustetun koneellisen poistoilmanvaihdon il-mavirta (kuva 3) ja huoneiston alipaine (kuva 4), teoreettinen malli.

Todellisissa rakennuksissa paine-eroon vaikuttavat sääolot, sisäiset ja ulkovaipan ilmavuodot, ulko-ovien ja tuuletusikkunoiden aukominen sekä muut käyttäjien toimenpiteet, kuten korvausilmaventtiilien sulkeminen.

Kuvassa 5 on esitetty mittausdataa todellisesta kohteesta 7 vuorokauden mittausjaksolta. Mittauksen kohteena olleessa asuinhuoneistossa on koneellinen poistoilmanvaihto ja ikkunoihin asennetut korvausilmaventtiilit (karmiventtiilit). Vihreä viiva edustaa huoneiston alipainetta ulkoilmaan verrattuna ja tumman sininen porrastasanteeseen verrattuna.



Kuva 5. Todellista mittausdataa koneellisen poiston kohteesta.

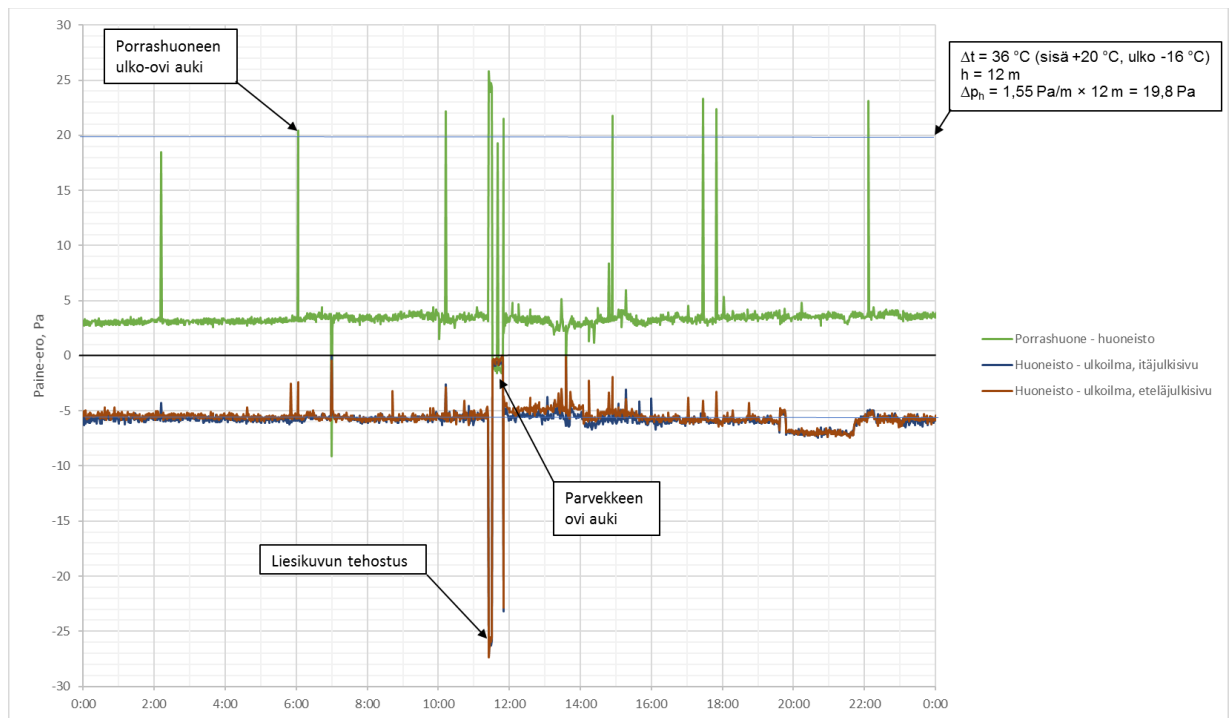
Vähätuulisten päivien aikana mitatusta paine-erosta on selkeästi havaittavissa tyypilliset 3 tehostusjaksoa aamulla, keskipäivällä ja illalla. Tuulisella säällä ilmanvaihdon kello-ohjattujen tehostusjaksojen vaikutus peittyy tuulenpaineesta aiheutuvan vaihtelun alle.

Tyynellä säällä huoneiston alipaineisuus on puolitetulla poistoilmavirralla (ns. normaaliteho) -2...-4 Pa ja tehostusjaksojen aikana -5...-10 Pa. Alipaineisuus kasvaa mittausjakson loppua kohti. Ulkolämpötilassa ei tapahtunut suurta muutosta, mutta rakennuksen sisätilat olivat jakson alussa liian lämpimiä ja lämpötila laskee jakson loppua kohti. Alipaineen kasvuun on mahdollisesti vaikuttanut sekä rakennuksen sisäisen termisen paine-eron muutos että ikkunatuuletuksen käytön väheneminen. Jakson lopulla mitattu huoneisto on ollut ylipaineinen porrastasanteeseen verrattuna, joten huoneistosta on tällöin virrannut sisäisten ilmapuotojen kautta ilmaa rakennuksen muihin sisätiloihin. Tämä on kasvattanut myös korvausilmaventtiilien ilmavirtaa ja huoneiston alipainetta ulkoilmaan verrattuna.

Paine-eromittauksen perusteella ao. huoneistossa on riittävä määrä korvausilmaventtiileitä, koska alipaine ei tehostusjaksojenkaan aikana kasva yli -15 Pa.

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, asuinkerrostalo

Kuvassa 6 on esitetty koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdoilla varustetun 5-kerroksisen asuinkerrostalon ylimmästä kerroksesta mitatut paine-erot yhden vuorokauden ajalta. Sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa on mitattu kahdelta julkisivulta, minkä lisäksi on mitattu porrashuoneen ja ao. huoneiston välistä paine-eroa. Porrashuoneen ja huoneiston välinen mittaus oli toteutettu siten, että positiivinen arvo ilmaisee porrashuoneen olevan ylipaineinen huoneistoon verrattuna.



Kuva 6. Paine-erot asuinkerrostalon 5. kerroksen huoneistossa. Mittaus on toteutettu pakkasjakson aikana, jolloin porrashuoneessa vaikutti lähes 20 Pa terminen paine-ero alimman ja ylimmän kerroksen välillä.

Mitattu asuinhuoneisto on varustettu koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla sekä tehostussäätöisellä liesikuvulla. Normaalitylanteessa huoneisto oli noin -6 Pa alipaineinen ulkoilmaan ja -3 Pa alipaineinen porrashuoneeseen verrattuna. Lyhytkestoiset yli 20 Pa ylipaineen piikit porrashuoneen paine-erossa johtuvat maanpinnan tasossa sijaitsevan porrashuoneen ulko-oven aukomisesta. Ulkoilman lämpötila vaihteli mittausjaksolla noin -15...-20 °C, minkä seurauksena porrashuoneen yläosa muuttui noin 18 Pa ylipaineiseksi ulkoilmaan verrattuna ulko-oven ollessa auki.

Liesikuvun tehostuksen käyttö noin 11:40-11:55 kasvatti huoneiston alipaineisuuden noin 20 pascalia normaalia suuremmaksi.

Mittaustuloksissa näkyy myös nopeaa, tuulesta aiheutuvaa vaihtelua päivällä, etenkin klo 12 ja 16 välisenä aikana.

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, muut rakennukset

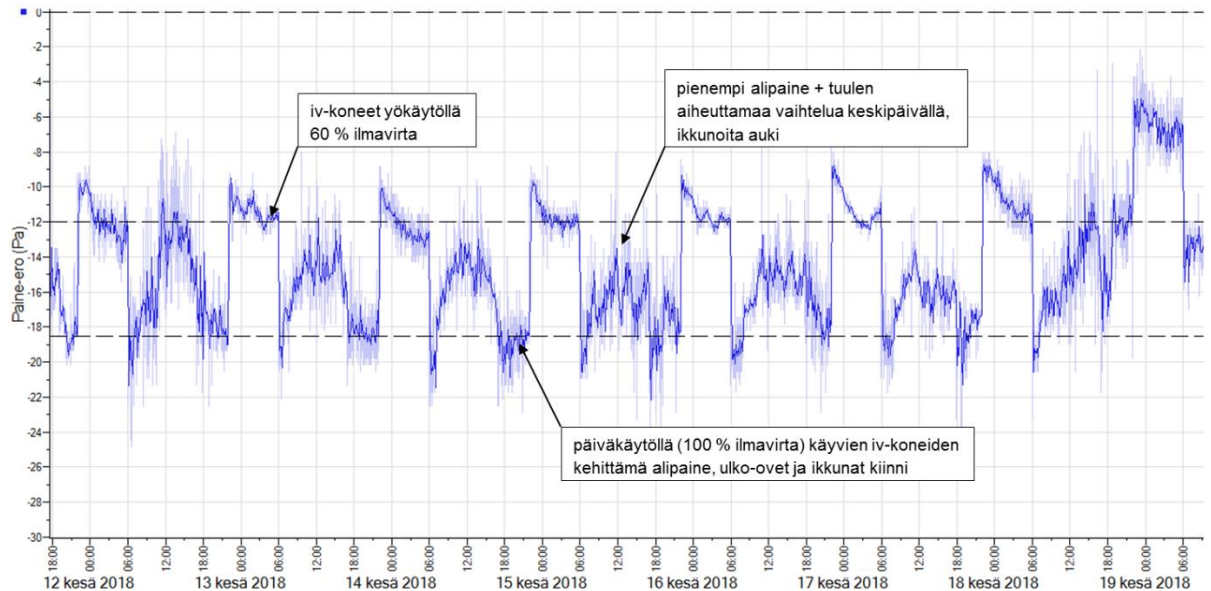
Koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustettujen rakennusten alipaineisuus ulkoilmaan verrattuna pitäisi olla vähäistä. Ilmanvaihtojärjestelmiä kuitenkin suunnitellaan ja säädetään "varmuuden vuoksi" alipaineisiksi, esimerkiksi mitoittamalla poistoilmavirta 5 tai 10 % tuloilmavirtaa suuremmaksi tai jättämättä erillispoistojen, kuten WC-tilojen poistot, huuvat tai vetokaapit, korvausilman tarve huomioimatta, mikä voi johtaa tarpeettoman suureen alipaineisuuteen.

Kuvassa 7 on esitetty koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetusta rakennuksesta mitattu paine-ero. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä on tyypiltään vakioilmavirtajärjestelmä, jossa ilmavirtaa ei säädetä tilojen käytön mukaan. Yöllä ilmanvaihto toimii osateholla. Tämä toteutetaan ohjaamalla iv-koneiden kierroslukusäätet puhaltimet aikaohjelmalla noin 40 % pienemmälle kierrosnopeudelle.

Tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä ilmanvaihdon tuottaman paine-eron ei pitäisi vaihdella vuorokauden aikana, mutta ilmavirtojen mitoituksen ja säädön tai ohjausautomaation puutteiden vuoksi paine-erossa voi esiintyä huomattavaa vaihtelua kumpaan suuntaan tahansa – alipaineisuus voi lisääntyä tai pienentyä yöaikaan.

Tulosten tulkinta

Rakennuksen käyttöaikoina ulko-ovien ja tuuletusikkunoiden aukominen vaikuttaa paine-eroa pienentävästi etenkin lämpimällä kesäsäällä. Kuvassa 7 tämä näkyy selkeänä alipaineisuuden kasvuna klo 17 aikoihin, jolloin useimmat käyttäjät poistuivat rakennuksesta.



Kuva 7. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon ja rakennuksen käytön vaikutus paine-eroon. Mittaus on toteutettu kesällä, joten sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on ollut pieni.

Ao. rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä ei ole säätötoimintojensa osalta monimutkainen eikä rakennuksessa ole suuria kosteuskuormia, joten mitään tarvetta yli -10 Pa alipaineen ylläpidolle ei ole.

Ehdotus: Tiiviiden rakennusten paine-eron tavoitetasot

Paine-eron mittausohjeen kommenttiversioiden liitteessä on esitetty keskustelun pohjaksi ehdotus sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron tavoitearvoista. Tätä liitettä ei tulla sisällyttämään paine-eron mittausohjeen lopulliseen versioon, vaan paine-eron tavoitetasoa koskevat ohjeavrot on tarkoitus sisällyttää myöhemmin julkistettavaan ilmanvaihdon painesuhteiden suunnittelu- ja säätöohjeeseen.

Taulukon 1 tavoitearvot on tarkoitettu tavanomaisille rakennuksille, joiden ulkovaippa on tiivis ja joiden sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero halutaan pitää mahdollisimman pienenä. Taulukon 1 tavoitetasot tarkoittavat ilmanvaihtojärjestelmän tuottamaa paine-eroa neutraalitalanteessa, jossa ulkovaipan paine-eroon eivät vaikuta tuuli eikä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero. Tämä toteutuu vain täysin tyyneellä säällä, kun ulkona on yhtä lämmintä kuin sisällä.

Taulukko 1. Ilmanvaihtojärjestelmän aikaansaaman sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron tavoitetaso.

Rakennuksen tyyppi	Normaali käyttötilanne	Maksimi-arvo	Lisätieto
Asuinpienitalo	0...-2 Pa	+2...-15 Pa (tehostus)	Pieni mitoitusilmavirta suhteessa ulkovaipan pinta-alaan tehostusratkaisut, esim. liesituuletin ja keskus-pölynimuri, huomioitava suunnittelussa lyhytaikainen ylipaine sallittua (ns. takkakytkintoiminto)
Asuinkerrostalo	0...-10 Pa	0...-15 Pa (tehostus)	Pienissä huoneistoissa suuri mitoitusilmavirta suhteessa ulkovaipan pinta-alaan tehostusratkaisut, esim. tehostussäätöinen liesikupu, huomioitava suunnittelussa
Toimisto-, liike- tai opetusrakennus, perustapaus	+5...-5 Pa	+5...-10 Pa	Ei erillispoistoja, mitoitusilmavirta noin 2 l/(s·m ²) vähäinen kosteuslisä
Paine-erojen hallinnan kannalta vaativat kohde	+5...-15 Pa	määritetään tapauskohtaisesti	Muuttuvailmavirtaiset ja siirtoilman käyttöön perustuvat järjestelmät, suuret mitoitusilmavirrat, poikkeuksellisen tiivis ulkovaippa, erillis- tai kohdepoistoja yli 25 m korkuinen rakennus

Muissa kuin asuinrakennuksissa paine-eron tavoitetaso tulee määrittää myös tilatyypeittäin, mikäli rakennuksessa on käyttötarkoitukseltaan erilaisia tiloja, jotka on erotettu toisistaan väliseinillä.

Tilat, joiden kosteuskuormitus on vähäistä ja joissa syntyy vain vähän epäpuhtauksia, voidaan mitoittaa 0 Pa paine-erolle ulkoilmaan verrattuna. Tällaisia tiloja mm. kuivat varastotilat ja avotoimistot, joiden henkilömäärä on pieni suhteessa tilan kokoon ja ulkoilmavirtaan.

Rakennuksen sisävyöhykkeen tilat, esimerkiksi ikkunattomat neuvotteluhuoneet, voidaan mitoittaa ylipaineisiksi sekä ulkoilmaan että muihin tiloihin nähden. Ylipaineisiksi voidaan mitoittaa myös tilat, joiden sisäilman kosteus on negatiivinen ts. sisäilman absoluuttinen kosteus on ulkoilman absoluuttista kosteutta alempi. Esimerkki tällaisesta rakennuksesta on jäähalli kesällä.

WC- ja pesutilat, muut ns. likaiset tilat sekä kosteusluokan 1 tilat (esim. laitoskeittiöt, uimahallit) mitoitetaan alipaineiseksi sekä ulkoilmaan että muihin sisätiloihin verrattuna. Tällä tavoin ehkäistään kosteuden, hajujen tai muiden epäpuhtauksien leviämistä rakennuksen sisällä sekä vähennetään ulkovaipan kosteusrasitusta.

Varmin ratkaisu eri tilatyyppien välisen paine-eron ylläpitoon on siirtoilman käyttö. Likaisempaan tai kosteuskuormitettuun tilaan johdetaan tällöin siirtoilmaa puhtaammasta tilasta ja paine-ero saadaan asetettua halutuksi siirtoilmalaitteen painehäviöllä, jonka on suositeltavaa olla 5...15 Pa. Paine-ero ulkoilmaan verrattuna ei kuitenkaan saa olla suurempi kuin -30 Pa.

Jos kosteuskuormitettuja tiloja ei saada erotettua rakennuksen muista tiloista, kaikki tilat suunnitellaan lievästi, esimerkiksi -5 Pa, alipaineisiksi ulkoilmaan verrattuina.

Mittauksen ja säädön epätarkkuuksien vuoksi paine-erossa tulee olla $\pm 2... \pm 5$ Pa toleranssialue. Toleranssialueen laajuus riippuu rakennuksen ilmatiiveydestä, mitoitusilmavirroista sekä järjestelmän monimutkaisuudesta.

Vaativassa kohteessa tulee ilmanvaihtojärjestelmän tuottaman paine-eron ohella huomioida myös sääoloista ja rakennuksen käytöstä syntyvät paine-erot.

Vaativia kohteita ovat

- yli 25 m korkeat rakennukset (termiset paine-erot rakennuksen sisällä, suurempi tuulennopeus)
- tuulelle alttiille paikoille, kuten meren rannalle, rakennetut rakennukset

Poikkeuksellisen vaativassa kohteessa (esimerkiksi yli 50 m korkuinen tornitalo) tarkastelu tulee ulottaa myös hetkellisiin paine-eroihin, koska hallitsemattoman suuret, yli 100 Pa, paine-erot voivat vaurioittaa rakenteita tai ehkäistä ovien avaamisen evakuointitilanteessa.