

Tapani Janhunen

# Ilmanvaihtokoneen ilmavirtojen säätö palvelualueen mitattuun paine-eroon pe- rustuen

Opinnäytetyö

Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Talotekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

|                 |  |
|-----------------|--|
| Tutkintonimike  | insinööri (ylempi AMK)   |
| Tekijä/Tekijät  | Tapani Janhunen  |
| Työn nimi       | Ilmanvaihtokoneen ilmavirtojen säätö palvelualueen mitattuun paine-eroon perustuen         |
| Toimeksiantaja  | Fidelix Oy   |
| Vuosi           | 2021   |
| Sivut           | 75 sivua, liitteitä 2 sivua  |
| Työn ohjaaja(t) | Mika Ruponen / XAMK, Antti Koskinen / Fidelix Oy ja Timo Keski-kuru / Senaatti-kiinteistöt |

## TIIVISTELMÄ

Rakennusten tiiveyden vaikutus sisäilman laatuun ja energiatehokkuuden korostamistarve ovat ajaneet rakentamista suuntaan, jossa rakennetaan tiiviimpiä rakennuksia. Tiiviin rakennuksen ilmanvaihdon epätasapaino voi aiheuttaa suuria paine-eroja sekä rakennuksen vaipan yli että myös tilojen välille. Suuret paine-erot aiheuttavat hallitsemattomia ilmavirtoja, jotka voivat olla osaltaan luomassa huonoja sisäilmaolosuhteita.

Opinnäytetyössä selvitettiin, voidaanko rakennusautomaatiojärjestelmällä säätää ilmanvaihtokoneen ilmamääriä ja rakennuksen painesuhteita rakennuksen vaipan yli olevien paine-ero mittauksien perusteella.

Työn teoriaosuudessa perehdyttiin rakennusten paine-erojen muodostumiseen, paine-eron mittaamiseen ja rakennusautomaatiojärjestelmään ilmanvaihdon ohjaamisessa.

Tutkimuksessa aineiston keräystä varten tutkimuskohteeseen asennettiin rakennusautomaatiojärjestelmään liitettäviä paine-erolähettäviä ilmanvaihtokoneiden palvelualueille. Säätojärjestelmän paine-erolähettimet mittasivat paine-eroa vaipan yli eri julkisivuilta ja tuulettuvasta ullakkotilasta. Tarkemman kokonaiskuvan muodostamiseksi kohteeseen asennettiin ilmamäärälähettäviä mittaamaan ilmanvaihtokoneiden ilmamääriä sekä tuulianturi mittamaan tuuliolosuhteita. Työssä kehiteltiin säätötapa, jolla ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmamäärän suhdetta voidaan säätää paine-eromittauksien pohjalta.

Kerätyn aineiston perusteelta vertailtiin paine-ero säädön toimivuutta, kahden eri valmistajan paine-erolähettäviä ja tuulettuvassa ullakkotilassa olevan ulko-referenssin toimivuutta.

Tutkimus osoittaa, että vaipan yli olevan paine-eromittauksen perusteella on mahdollista säätää palvelualueen ilmanvaihtokoneen ilmamääriä ja vaipan yli olevaa paine-eroa. Työn tuloksien perusteella voidaan jatkokehittää paine-eroon perustuva säätötapa.

**Asiasanat:** Rakennuksen paine-ero, painesuhteet, paine-eromittaukset, paine-eron säätö, rakennusautomaatio, ilmanvaihto

|                  |  |
|------------------|--|
| Degree           | Master of Engineering  |
| Author (authors) | Tapani Janhunen  |
| Thesis title     | Adjusting airflows of an air handling unit based on the pressure difference measurements of the service area |
| Commissioned by  | Fidelix Oy   |
| Time             | May 2021   |
| Pages            | 75 pages, 2 pages of appendices  |
| Supervisor       | Mika Ruponen / XAMK , Antti Koskinen / Fidelix Oy and Timo Kesikuru / Senaatti-kiinteistöt                   |

## ABSTRACT

The effect of building airtightness on indoor air quality and the need to emphasize energy efficiency have moved construction to a direction where more airtight buildings are being built. The imbalance of ventilation in an airtight building can cause large pressure differences both over the building envelope and between spaces. Large pressure differences cause uncontrolled airflows that can impair poor indoor air conditions.

In this thesis, it was determined if a building automation system, can enable adjusting air volumes of an air handling unit and pressure ratios of a building, based on the pressure difference measurements over the building envelope.

The theoretical part of the thesis introduces the formation of pressure differences of buildings, measurement of pressure difference, and controlling ventilation by a building automation system.

To gather material for the study, pressure difference transmitters attachable to the building automation system were installed in service areas of the air handling unit. The transmitters in the system measured pressure differences over the building envelope from different facades and from the ventilated attic space. For a better overall picture, air volume transmitters were installed to measure air volumes of the air handling units, and a wind sensor was installed to measure wind conditions. An adjustment method was developed, where the supply and exhaust air ratio in the air handling unit can be adjusted based on pressure difference measurements.

Functionality of pressure difference adjustment, pressure difference transmitters from two different manufacturers, and the functionality of external reference in the ventilated attic space were compared based on the collected material.

The study shows that it is possible to adjust air volumes and pressure difference over the building envelope in the service area of ventilation unit based on pressure difference measurement over the building envelope. On the basis of the study's results, this adjustment method can be further developed.

**Keywords:** Buildings pressure difference, pressure ratio, pressure difference measurements, pressure difference adjusting, building automation, ventilation

# SISÄLLYS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | JOHDANTO.....   | 6  |
| 1.1   | Taustatiedot.....   | 6  |
| 1.2   | Tavoitteet ja rajaus .....  | 6  |
| 1.3   | Toteutus.....   | 7  |
| 2     | RAKENNUKSEN PAIN-EROT .....   | 7  |
| 2.1   | Tuuli.....  | 8  |
| 2.2   | Savupiippuvaikutus.....   | 10 |
| 2.3   | Ilmanvaihto .....   | 11 |
| 2.4   | Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveys .....  | 14 |
| 3     | PAIN-ERON MITTAAMINEN JA ILMANVAIHDON OHJAAMINEN .....                                    | 15 |
| 3.1   | Paine-eron mittaus.....   | 15 |
| 3.1.1 | Paine-eron mittaustekniikat.....  | 15 |
| 3.1.2 | Hetkellinen mittaus .....   | 16 |
| 3.1.3 | Seurantamittaus.....  | 19 |
| 3.1.4 | Jatkuva mittaus.....  | 20 |
| 3.1.5 | Savupiippuvaikutus paine-erolähettimen impulssiputkessa .....                             | 20 |
| 3.1.6 | Soveltuvia mittalaitteita .....   | 22 |
| 3.2   | Rakennusautomaatiojärjestelmä.....  | 25 |
| 3.3   | Ilmanvaihdon automaatio.....  | 26 |
| 3.4   | Ilmanvaihtokoneen ilmamäärän säätö vaipan yli olevan paine-eromittauksen perusteella..... | 28 |
| 4     | TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄ .....   | 29 |
| 4.1   | Tutkimuskohde .....   | 29 |
| 4.2   | Tutkimuskohteen ilmanvaihtojärjestelmä .....  | 30 |
| 4.3   | Tutkimuskohteeseen toteutetut muutokset aineiston keräystä varten.....                    | 31 |
| 4.3.1 | Rakennusautomaatiojärjestelmä.....  | 32 |
| 4.3.2 | Paine-erolähtimet.....  | 32 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.3.3 | Ilmamäärälähettimet .....  | 38 |
| 4.3.4 | Tuulianturi .....  | 39 |
| 4.4   | Tutkimusmenetelmät .....   | 40 |
| 4.4.1 | Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron säätö.....                | 40 |
| 4.4.2 | Paine-eron mittaaminen.....  | 42 |
| 5     | TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....                              | 44 |
| 5.1   | Ilmamäärän säätö paine-eromittauksen perusteella .....             | 44 |
| 5.1.1 | Säädön käyttäytyminen rakennuksen A-osalla .....                   | 45 |
| 5.1.2 | Säädön käyttäytyminen rakennuksen B-osalla .....                   | 48 |
| 5.1.3 | Säädön käyttäytyminen rakennuksen C-osalla .....                   | 51 |
| 5.1.4 | Säädön käyttäytyminen rakennuksen D-osalla .....                   | 55 |
| 5.1.5 | Paine-erosäädön toimivuus koko rakennuksen osalta .....            | 57 |
| 5.2   | Kahden eri valmistajan paine-erolähettimien vertailu.....          | 60 |
| 5.3   | Paine-erolähttimen ulkoreferenssin sijainnin vertailu .....        | 62 |
| 5.4   | Paine-erolähttimen asennuskorkeuden vaikutus mittaustulokseen..... | 63 |
| 6     | POHDINTA .....   | 67 |
|       | LÄHTEET.....   | 73 |

## LIITTEET

Liite 1. Paine-eron vertailumittauksen suoritusohje

Liite 2. Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet

## **1 JOHDANTO**

### **1.1 Taustatiedot**

Tämän työn toimeksiantajana toimi Fidelix Oy. Työ tehtiin tiiviissä yhteistyössä Senaatti-kiinteistöjen kanssa, joka antoi aiheen ja mahdollisti pilottikohteen käytön tutkimusta varten. Pilottikohteenä toimi Kuopin verotalo. Fidelix Oy on suomalainen rakennusautomaatiojärjestelmien kehittämiseen ja urakointiin erikoistunut yritys. Senaatti-kiinteistöt on Suomessa valtiovarainministeriön alainen liikelaitos, joka tuottaa tilapalveluja ensisijaisesti valtionhallinnon asiakkaille.

Nykyiset rakentamismääräykset ovat ajaneet rakentamista suuntaan, jossa rakennetaan tiiviimpiä rakennuksia kuin ennen. Myöskin saneerattavien kohteiden osalta tehtävät tiivistyskorjaukset tekevät vanhoistakin rakennuksista tiiviimpiä. Tämä aiheuttaa haasteita rakennuksen ilmanvaihdon toiminnalle ja säätötyölle. Nykyisen tietämyksen mukaan rakennuksien ilmanvaihto pyritään säätämään tasapainoiseksi. Ilmanvaihdon käyttötilanteen muutokset, rakennuksen tiiviiden parantaminen ja suodattimien likaantumiset yms. muuttuvat tekijät voivat aiheuttaa sen, että paine-ero vaipan yli muuttuu mitoitustilanteesta. Rakennusten paine-eroihin ei myöskään aiemmin ole kiinnitetty huomiota. Tyypillisesti rakennusten poistoilmamäärät on säädetty suuremmaksi kuin tuloilmamäärät. Tiiviin rakennuksen ilmanvaihdon epätasapaino voi aiheuttaa suuria paine-eroja sekä rakennuksen vaipan yli että myös tilojen välille. Suuret paine-erot aiheuttavat hallitsemattomia ilmavirtoja, jotka voivat olla osaltaan luomassa huonoja sisäilmaolosuhteita. Senaatti-kiinteistöillä on asennettu ja seurattu paine-eromittauksia vaipan yli ja alettu pohtimaan, voitaisiinko paine-eroa pitää halutussa asetusarvossa hallitusti ohjaamalla ilmanvaihtokoneita mittauksen perusteella.

### **1.2 Tavoitteet ja rajaus**

Tyypillisesti toteutettu ilmanvaihtokoneen ohjaus ei huomioi rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron muutoksia, jotka ovat riippuvaisia sisäisistä- ja ulkoisista tekijöistä. Työssä haluttiin selvittää, kuinka vaipan yli oleviin paine-eroihin voitaisiin vaikuttaa ilmanvaihtokoneiden ohjaustavan muutoksilla. Tutkimuksella haluttiin vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Voidaanko ilmanvaihtokoneen ilmamääriä hienosäätä aktiivisesti rakennuksen vaipan yli mitatun paine-eron mukaisesti siten, että rakennuksen paine-ero pyritään pitämään paine-erosäädöllä asetusarvossaan?
- Onko kahden eri valmistajan paine-erolähettimien mittaustuloksissa eroa?
- Miten paine-eromittauksen, jonka ulkoreferenssi on sijoitettu räystäältä tuulettuvaan ullakkotilaan, eroa mittauksesta, jonka ulkoreferenssi on rakennuksen ulkoseinällä?
- Onko paine-ero lähttimen asennuskorkeudella vaikutusta mittaustulokseen?

Tavoitteena oli varmistua, onko vaipan yli olevaan paine-eromittaukseen perustuva ilmamäärien säätötapa käyttökelpoinen ja mitä asioita tulee huomioida säätötavan jatkokehityksessä.

Työ rajattiin koskemaan sisäilmanolosuhteista ainoastaan rakennuksen vaipan yli olevaa paine-eroa.

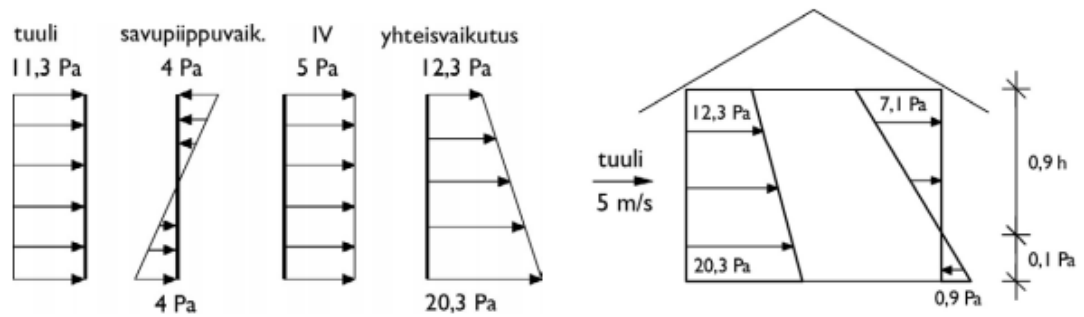
### **1.3 Toteutus**

Työssä perehdyttiin kirjallisuuskatsauksella rakennuksen paine-eroihin vaikuttaviin tekijöihin, paine-eron mittaamiseen, rakennusautomaation ilmanvaihdon ohjaamisessa ja paine-eron perusteella tehtävään ilmamäärien säätämiseen.

Tutkimusaineiston keräystä varten tutkimuskohteena olleeseen toimistorakennukseen lisättiin mittalaitteita ja tehtiin muutoksia ilmanvaihdon ohjaukseen. Varsinaisen tutkimuskohteen lisäksi aineistoa kerättiin myös kahdesta muusta toimistorakennuksesta.

## **2 RAKENNUKSEN PAINE-EROT**

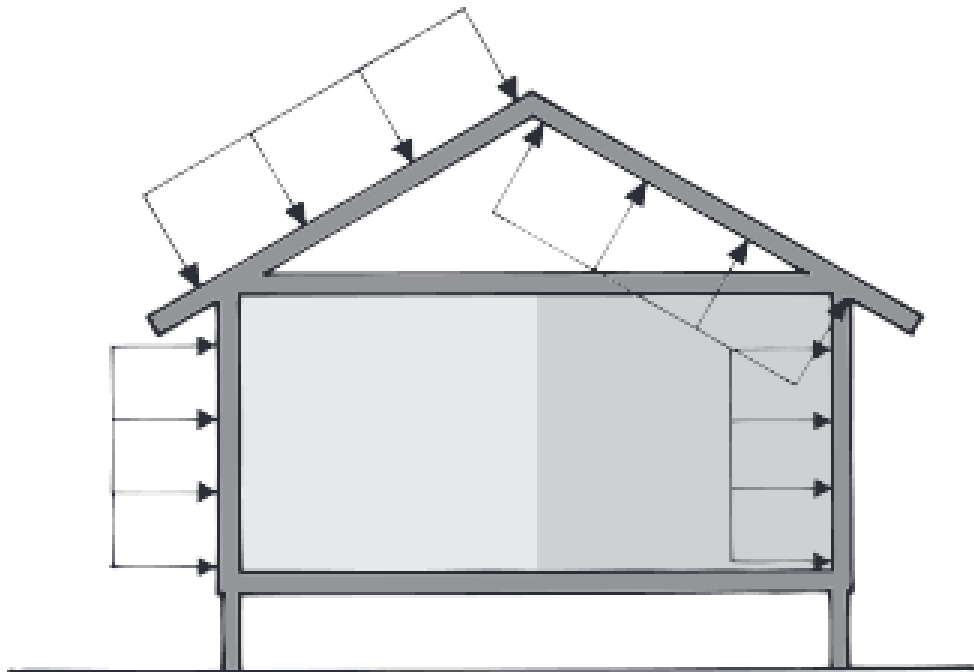
Kuvassa 1 on esitetty rakennuksen ulkovaipan yli olevan paine-eron muodostuvat kolmesta tekijästä, jotka ovat tuuli, ulko- ja sisälämpötilojen eroista ja tilan korkeudesta johtuva savupiippuvaikutus ja ilmanvaihtojärjestelmä. Mitä tiiviimpi rakennus kyseessä, sitä helpommin paine-eroja syntyy, kun ilma ei pääse kulkemaan ulkovaipan läpi hallitsemattomasti ja tasamaan paine-eroa. Painesuhteet vaihtelevat eri vuorokauden- ja vuodenaikoina riippuen edellä mainituista tekijöistä. (Pitkäranta 2016, 122.)



Kuva 1. Rakennuksen paine-eroon vaikuttavat tekijät tuuli, savupiippuvaikutus ja ilmanvaihto (Pitkäranta 2016)

## 2.1 Tuuli

Tuuli aiheuttaa huonetilaan paine-eroja, jotka ovat riippuvaisia tuulen suunnasta ja nopeudesta, ympäröivästä maastosta ja kasvillisuudesta sekä rakennuksen muodosta ja korkeudesta. Kohtaavaan seinään tuuli aiheuttaa ylipainetta ja sivu sekä suojanpuoleisille seinille alipainetta. Huonetilaan tuuli aiheuttaa tuulenpuoleiselle seinälle alipainetta ja suojanpuoleiselle seinälle ylipainetta, kuten kuvasta 2 voidaan havaita. (Siikanen 2014, 9, 37.)



Kuva 2. Tuulenpainevaikutus (Siikanen 2014)

Tuulen aiheuttama paine rakennuksen ulkoseinälle voidaan laskea yhtälöstä 1 (Siikanen 2014, 10):

$$p = c_1/2\rho v^2 \quad (1)$$

jossa



$p$  = yli- tai alipaine rakennuksen ulkoseinämällä (Pa)

$c$  = rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta johtuva riippuva vakio

$\rho$  = ulkoilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = tuulen nopeus (m/s)

Kertoimen  $c$  arvot vaihtelevat huomattavasti eri tutkijoiden tulosten välillä. Virhetekijöiden suuresta määrästä johtuen yksittäisen rakennuksen painekenttää on vaikea määrittää tarkasti. Svenska Bygnorm antaa  $c$ :lle arvot (Siikanen 2014, 10):

- tuulenpuoleinen seinä +0,7
- suojanpuoleinen seinä -0,5
- tuulen suuntainen seinä -0,6...-1,2

Tuulennopeus ilmoitetaan yksikössä m/s, ja meteorologiassa se tarkoittaa 10 minuutin aikaista tuulen keskinopeutta. Puuskittainen tuuli voi olla hetkellisesti mitattuna huomattavasti keskinopeutta suurempi. Tuuli voi voimistua maaston muodon tai rakennetun ympäristön johdosta tietyillä tuulen suunnilla. Tällaisia paikkoja rakennetussa ympäristössä voivat olla kapeat tilat, kuten kadut, käytävät ja rakennusten välit. (Siikanen 2014, 11.)

Tuulen nopeudet voivat poiketa olennaisesti avoimessa maastossa mitatun ja rakennetussa ympäristössä valitsevan tuulen nopeuden välillä. Tuulen nopeus, joka kohdistuu rakennukseen, voidaan laskea seuraavan kaavan mukaisesti:

$$v = \beta \cdot v_M \quad (2)$$

jossa

$v$  = tuulen nopeus (m/s)

$\beta$  = tuulisuuskertoimen taulukko 1:n mukaisesti

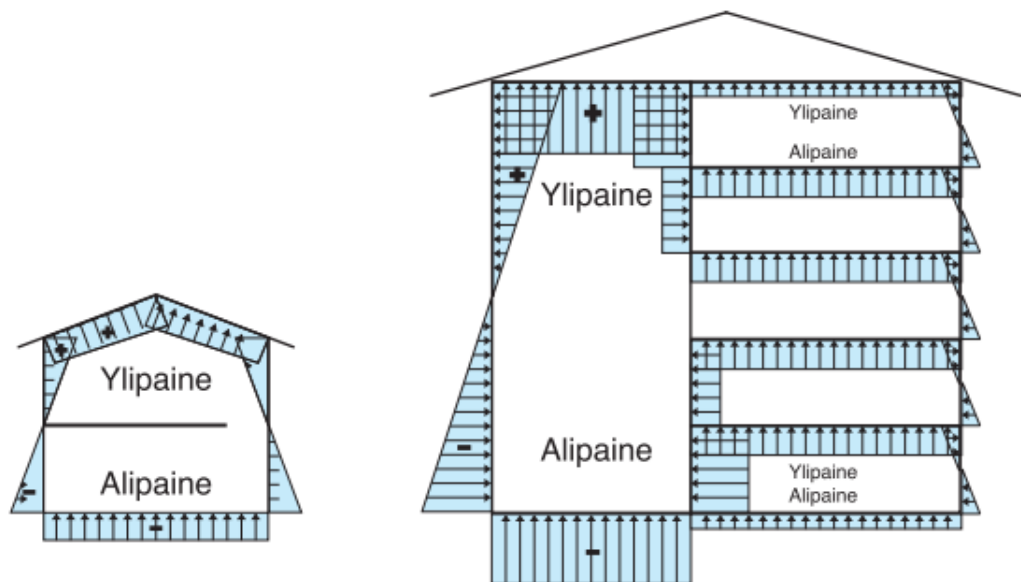
$v_M$  = lähimmällä säähavaintoasemalla mitattu tuulen nopeus

Taulukko 1. Ympäröivän maaston tuulisuuskertoimen (Siikanen 2014)

| Maaston tyyppi              | $\beta$ |
|-----------------------------|---------|
| Avoin kenttä                | 1,00    |
| Puutarha, harvaa puustoa    | 0,70    |
| Väljä pientaloalue          | 0,50    |
| Metsä, tiheä pientaloalue   | 0,35    |
| Kerrostalojen suojaama alue | 0,27    |
| Kaupunkien keskiosat        | 0,18    |

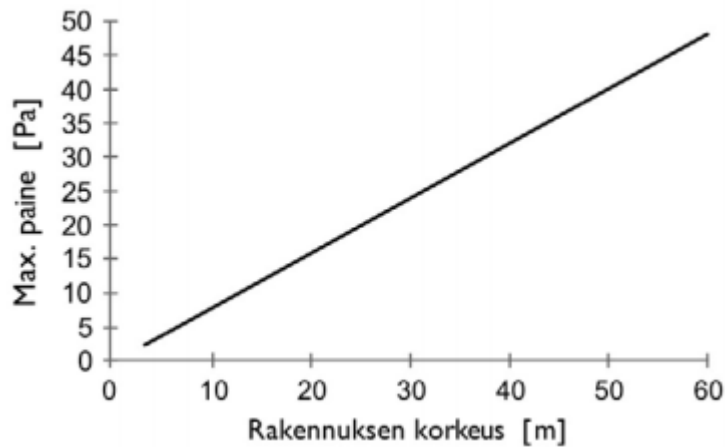
## 2.2 Savupiippuvaikutus

Savupiippuvaikutus syntyy, kun lämmennyt huoneilma, jonka ilman tiheys on kylmää ilmaa pienempi, pyrkii nousemaan ylöspäin. Kuvasta 3 voidaan nähdä, kuinka savupiippuvaikutuksen johdosta tilan yläosaan muodostuu ylipainetta ja vastaavasti alaosaan alipainetta. Neutraaliakselin ilmanpaine vastaa ulkona vallitsevaa ilmanpainetta. Neutraaliakselin sijaintiin vaikuttaa tilan aukot ja hormit. (Siikanen 2014, 36.)



Kuva 3. Paine-ero jakauma, joka syntyy sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksen johdosta (Katto-liitto ry 2019)

Savupiippuvaikutuksen suuruuteen vaikuttavat sisä- ja ulkoilmalämpötilan välinen ero sekä vapaan ilmatilan korkeus. Kuvasta 4 voidaan nähdä, kun sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ollessa 20°C ylipaine kasvaa 0,9 Pa metriltä savupiippuvaikutuksen johdosta. (Pitkäranta 2016, 120.)



Kuva 4. Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine sisä- ja ulkolämpötilan eron ollessa 20 °C (Pitkäranta 2016)

Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero voidaan laskea kaavasta (Sandberg 2016, 107):

$$\Delta p = \frac{T_s - T_u}{T_u} \rho_s g h \quad (3)$$

jossa

$\Delta p$  = hormissa syntyvä paine-ero

$T_s$  = sisäilman absoluuttinen lämpötila, [K]

$T_u$  = ulkoilman absoluuttinen lämpötila, [K]

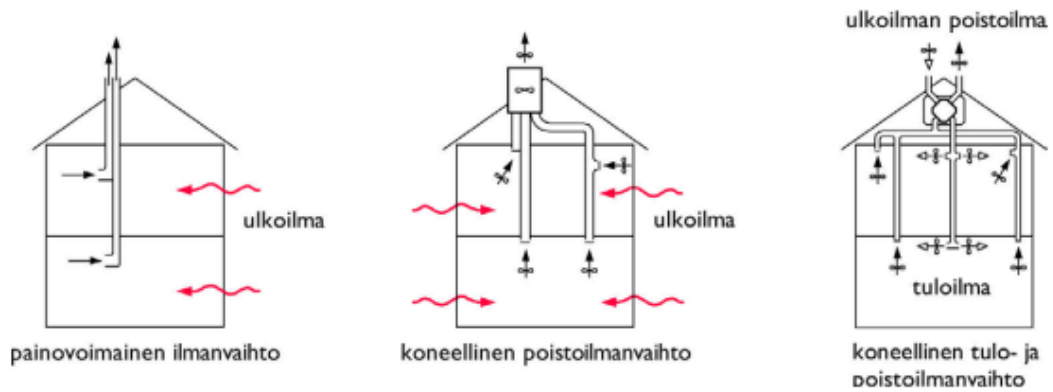
$\rho_s$  = Sisäilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = painovoiman kiihtyvyys = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$h$  = hormivaikutuksen korkeus

### 2.3 Ilmanvaihto

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmällä on merkitys sen aiheuttamaan paineeroon. Kuvassa 5 on esitetty käytettyjä ilmanvaihtojärjestelmiä, joita ovat painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, koneellinen poistoilmavaihtojärjestelmä ja koneellinen tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmä. (Pitkäranta 2016, 121.)



Kuva 5. Erilaisia ilmanvaihtojärjestelmiä (Pitkäranta 2016)

Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmän toiminta perustuu sisä- ja ulkolämpötilan eroon. Toiminta on siten tehokasta talvella ja heikompaa kesällä. Sisäilma poistuu järjestelmässä poistoilmanvaihtoputkien kautta, ja tuloilma tulee sisään joko korvausilmaventtiilien tai ikkunavälin kautta. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä ei merkittävästi lisää rakennuksen paine-eroja. (Päkkilä 2012, 72.)

Painovoimaan perustuva ilmanvaihtojärjestelmä on ollut käytetyin aina 1970-luvulle asti (Sandberg 2014, 114).

Koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää on alettu suunnitella 1960-luvun puolivälissä, ja se ollut vallitseva vielä 1970-luvulla. Siinä ”likaiset” tilat, kuten wc, pesuhuone, sauna, vaatehuone ja keittiö, on varustettu poistoilmaventtiilein, jotka on johdettu kanavia pitkin katolla olevalle huippumurille. Ilman siirtyminen muista huonetiloista poistokohteisiin on hoidettu oviraoin. Poistoilma luo rakennukseen alipaineen, jonka avulla ulkoilma epäpuhtauksineen tulee epätiivisiin rakennuksen vaipan läpi helpointa reittiä, kuten painovoimaisessa ilmanvaihdossa. (Sandberg 2014, 115–116.)

1970-luvun puolivälin öljykriisin ja siitä seuranneen energian hinnan nousun johdosta alettiin kehittämään ilmanvaihtojärjestelmiä, joissa oli poistoilman lämmön talteenotto. Lämmön talteenotolla tuloilman lämmittämien tuli huomattavasti edullisemmaksi ja ilma voidaan tuoda tilaan vedottomasti. Nämä tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmät ovat olleet käytetyimpiä ilmanvaihtojärjestelmiä 1980-luvulta pientaloissa ja yleistyneet kerrostaloissa 1990-luvulla. Tulo-

ja poistoilmanvaihdossa poistoilma johdetaan poistoilmaventtiileiltä poistoilmakanavaa pitkin ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenotto osaan, joka lämmittää ulkoilman, ennen kuin se johdetaan tuloilmakanavan kautta tuloilmaventtiileille. Ilman liikkuminen kanavistossa saadaan aikaseksi ilmanvaihtokoneessa sijaitsevilla tulo- ja poistoilmapuhaltimilla. (Sandberg 2014, 116–123.)

Koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän aikaansaamat paine-erot johtuvat järjestelmän tehokkuudesta ja säädöistä, rakennuksen ulkovaipan tiiveydestä ja ilmanvaihto venttiilien määrästä ja sijoittelusta. Rakennuksen tiiveyteen vaikuttaa käytetyt rakenneratkaisut ja ulkokuoren epäjatkuvuuskohdat, kuten ovet, ikkunat, saumat. Tuloilmanvirran ollessa suurempi kuin poistoilmavirran on rakennus ylipainen ja vastaavasti poistoilmavirran ollessa suurempi kuin tuloilmavirran alipaineinen. (Pitkäranta 2016, 121.)

Aikaisemmin voimassa olleen Suomen Rakennusmääräyskokoelman osassa D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto (1987, 2003, 2010 ja 2012), todetaan rakennuksen painesuhteista seuraavasti: *“Rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi, jotta voitaisiin välttyä kosteusvaurioilta rakenteissa sekä mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta. Alipaine ei kuitenkaan saa yleensä olla suurempi kuin 30 Pa.”*

Nykyään voimassa olevan ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mukaisesti on rakennuksen ulko- ja ulospuhallusvirrat suunniteltava tasapainoon staattisessa tilanteessa, ellei tätä toiminnan erityisluonne toisin edellytä. Järjestelmän suunnittelussa on huomioitava erillispoistojen tai muusta käyttötilanteesta mahdollisesti johtuva epätasapaino tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen ja osoitettava, mistä korvausilma saadaan. (Talotekniikkainfo 2020, kappale 21.)

Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät ovat siis suunniteltu lähtökohtaisesti ulkoilmaan nähden alipaineiseksi D2:n 1987 julkaisusta alkaen aina 2018 voimaan tulleen ympäristöministeriön asetukseen asti. Nykyisen ympäristöministeriön asetuksen mukaisesti ilmanvaihtojärjestelmät suunnitellaan tasapainoiseksi.

## 2.4 Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveys

Rakennuksen vaipan sekä tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin tiiviitä, että ilmapirrat rakenteiden vuotokohtien läpi ei aiheuta merkittäviä haittoja rakennukselle, käyttäjille tai energiatehokkuudelle. Huomioitavia kohteita ovat erityisesti liitos ja läpivientikohdat. (Ympäristöministeriön Tasauslaskentaopas 2018, 25.)

Rakennuksen tiiveyden tarkastelussa käytetään ilmanvuotoluku  $n_{50}$  (1/h), joka kertoo, kuinka useasti rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta rakennukseen aiheutetun 50 Pa:n ali- tai ylipaineen johdosta. Kuvattaessa rakennusvaipan keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa 50 Pa:n paine-erolla rakennusvaipan pinta-alaa kohden käytetään ilmanvuotolukua  $q_{50}$  ( $m^3 / (h \cdot m^2)$ ). (Paloniitty 2013, 155.)

Rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku ( $q_{50}$ ) voi olla ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuuden 27 § mukaisesti enintään  $4,0 m^3 / (h \cdot m^2)$ . Tätä lukemaa voidaan käyttää rakennuksen suunnitteluratkaisun lämpöviöiden laskennassa. Pienempää ilmanvuotolukua voidaan käyttää osoittamalla ilmanpitävyys joko jälkikäteen mittaamalla tai muulla menettelyllä. (Ympäristöministeriön Tasauslaskentaopas 2018, 25.)

Taulukosta 2 voidaan havaita, kuinka eri ilmamäärillä on vaikutusta rakennuksen paine-eroihin eri tiiviystason rakennuksissa (Kuurola 2016). Suunnittelukäytäntö, jossa poistoilmamäärä mitoitettiin 10–15 % tuloilmamäärää suuremmaksi ei aiheuta ongelmia paine-eron suhteen asetuksen vähimmäistason täyttävässä rakennuksessa. Nykyaikaisesti rakennetussa tiiviissä ja energiatehokkaassa rakennuksessa vanhalla suunnittelukäytännöllä ilmamäärien mitoitaminen johtaa ylisuuriin paine-eroihin rakennuksen vaipan yli (Kuurola 2016).

Taulukko 2. Ilmamäärien vaikutus rakennuksen vaipan yli olevaan paine-eroon (Kuurola 2016)

| Ilmanvaihdon säätö         | Paine-ero (Pa)    | Paine-ero (Pa)   | Paine-ero (Pa)    |
|----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                            | $n_{50}=0,15$ 1/h | $n_{50}=4,0$ 1/h | $n_{50}=10,0$ 1/h |
| Tasapainotettu ilmanvaihto | -7...+4           | -6...+4          | -6...+4           |
| 15 % vähemmän tuloilmaa    | -33...-22         | -7...+4          | -6...+4           |
| 15 % enemmän tuloilmaa     | +15...+26         | -6...+5          | -5...+4           |

### 3 PAINE-ERON MITTAAMINEN JA ILMANVAIHDON OHJAAMINEN

#### 3.1 Paine-eron mittaus

Paine on suure, joka on johdettu kohtisuoraan vaikuttavan voiman ja pinta-alan suhteesta seuraavasti (Saxholm & Rantanen 2011, 5–6):

$$p = \frac{F}{A} \quad (4)$$

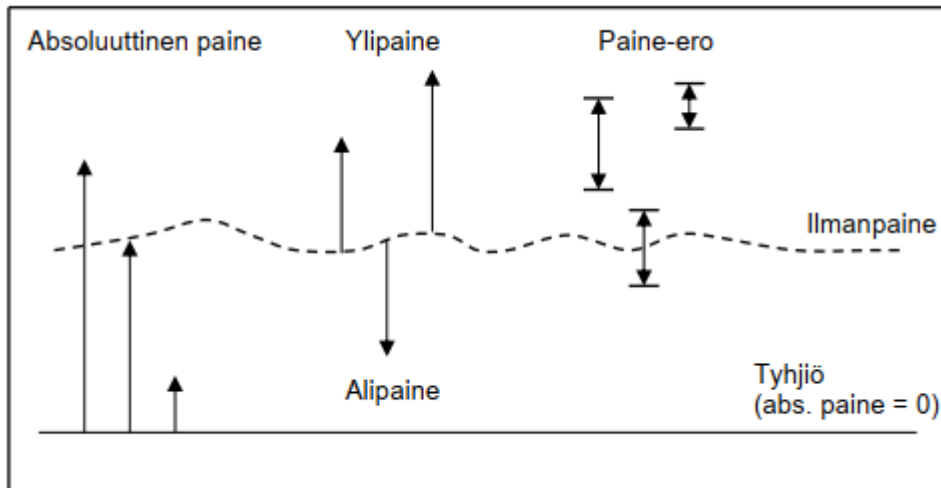
jossa

$p$  = paine (Pa=N/m<sup>2</sup>)

$F$  = voima (N)

$A$  = pinta-ala (m<sup>2</sup>)

Painetta ei voida suoranaisesti mitata vaan mittaus on aina paine-eron mitausta. Kuvassa 6 on esitetty, kuinka mittauksen vertailuarvosta riippuen paineelle käytetään seuraavanlaisia nimityksiä: absoluuttinen paine, vallitseva ilmanpaine, ylipaine, alipaine ja paine-ero. (Saxholm & Rantanen 2011, 6–7.)

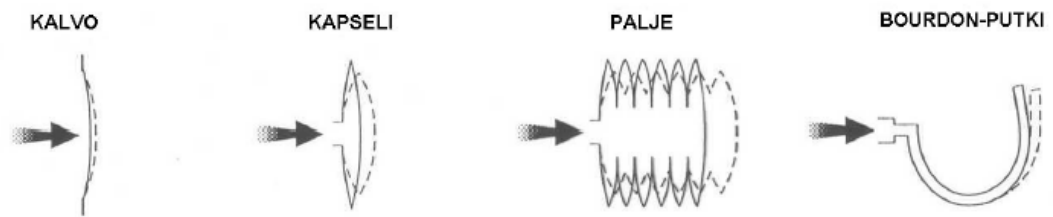


Kuva 6. Paineen mittaamisessa käytettyjä nimityksiä (Saxholm ja Rantanen 2011)

#### 3.1.1 Paine-eron mittaustekniikat

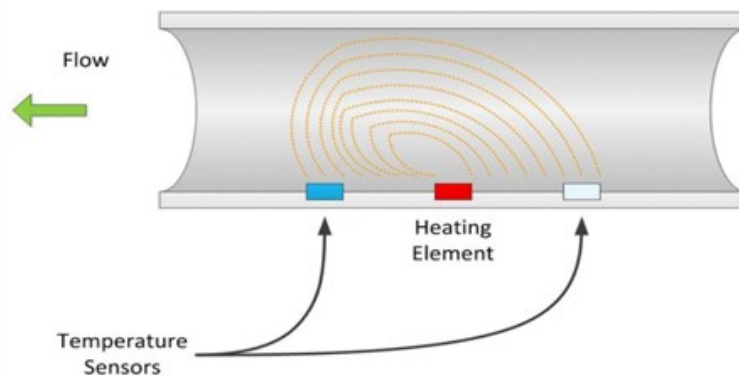
Rakennuksien paine-erojen mittaamisen käytetyt lähettimet perustuvat pääosin kahteen mittaustekniikkaan.

Mekaanisen muodonmuutokseen perustuvat lähettimissä paineen vaikutus liikuttaa tuntopäätä, kuten kuvasta 7 voidaan havaita. Muodonmuutoksen eli liikkeen on oltava riittävän pieni, jotta se kestää materiaalin puitteissa joustavalla alueella. Tuntopään liikkeen havaitsemiseksi ja sen muuttamiseksi paineeksi käytetään erilaisia tekniikoita riippuen mittauslaitteen tyypistä. Näitä ovat mekaaninen tai sähköinen vahvistus tai voidaan hyödyntää vastuksen, kapasitanssin tai värähtelytaajuuden riippuvuutta liikkeestä. (Saxholm & Rantanen 2011, 16.)



Kuva 7. Tuntopään muutos paineen vaikutuksesta (Saxholm & Rantanen 2011).

Kuvasta 10 nähdään, kuinka virtaukseen perustuvassa paine-eroanturissa kaasu liikkuu anturin läpi korkeammasta paineesta matalampaa painetta kohti. Sulautettu lämpöelementti luo tunnetun lämpövuon kaasuun ja virtausnopeus tunnistetaan kahdella lämpötila anturilla. Virtausnopeuden perusteella määritellään paine-ero. (First Sensor Ltd 2020.)



Kuva 8. Virtaukseen perustuva paine-eroanturi (First Sensor Ltd)

### 3.1.2 Hetkellinen mittaus

Hetkellisellä paine-ero mittauksella voidaan määrittää mittaushetkellä vallitseva paine-ero joko kahden huonetilan tai huonetilan ja ulkoilman välillä. Mittauksella halutaan yleensä selvittää ilmanvaihdon rakennukseen tuottama



paine-ero. Mittauksessa on huomioitava rakennuksessa käytetty ilmanvaihto-järjestelmä ja sekä valittava, missä järjestelmän käyttötilanteessa mittaus suoritetaan. Mitattaessa rakennuksen sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa on huomioitava, että tuuli ja käyttäjien toiminta aiheuttavat mittaustulokseen vaihtelua, joka voidaan tulkita mittausrvirheeksi. (Björkroth & Eskola 2019, 23.)

Rakennuksissa olevat paine-erot ovat pieniä eikä ennalta ole aina tietoa, onko mitattava tila yli- vai alipaineinen. Seuraavat vaatimukset vaaditaan käytettävältä mittalaitteelta:

- paine-eron mittaus alue vähintään -50...+50 Pa
- lukematarkkuus vähintään 1 Pa (0,1 Pa suositeltava)
- mittausrvirhe pienillä (-10...+10 Pa) paine-eroilla enintään  $\pm 1$  Pa

(Björkroth & Eskola 2019, 23.)

Mittaus suoritetaan liittämällä mittausletku paine-eromittarin miinus- tai referenssiliittimeen ja jättämällä mittarin plusliitin vapaaksi. Paine-eromittarin osoittaessa positiivista mittaustulosta on tila ylipaineinen ja vastaavasti paine-eromittarin osoittaessa negatiivista tulosta on tila alipaineinen. Mitattaessa huonetilan ja ulkoilman välistä paine-eroa, mittaus suoritetaan n. 1,0 m korkeudelta lattiasta esimerkiksi tuuletusikkunan välistä kuten kuvassa 9 on esitetty. Mikäli paine-eromittauksen läpivienti eroaa tavoitearvosta enemmän kuin 0,3 m, lukemaa tulee korjata vastaamaan paine-eroa 1,0 m korkeudella. Mikäli läpiviennin korkeusasema on alle  $\pm 1,0$  m referenssitasoon nähden ja sisä- ja ulkoilman välinen lämpötila ero alle  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , korjausta ei tarvita. Mikäli läpiviennin korkeusasema eroaa yli 1,0 m referenssitasosta ja sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on yli  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , korjauslaskenta on tehtävä. Läpiviennin korkeusasema lattiatasoon nähden on mitattava ja kirjattava muistiin 0,1 m tarkkuudella. (Björkroth & Eskola 2019, 24,27.)



Kuva 9. Kuparikaapilaariputken vienti ulos tuuletusikkunan alareunasta

Korjauslaskennalla kompensoidaan termisen paine-eron vaikutusta mittaustulokseen määrittäen kuvan 10 avulla termisen paine-eron määrä ja laskemalla korjattu mittaustulos kaavan avulla seuraavasti:

$$\Delta P_{korjattu} = \Delta P_{mitattu} - \frac{\Delta p}{\Delta h} \cdot (h_1 - h_0) \quad (5)$$

jossa

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

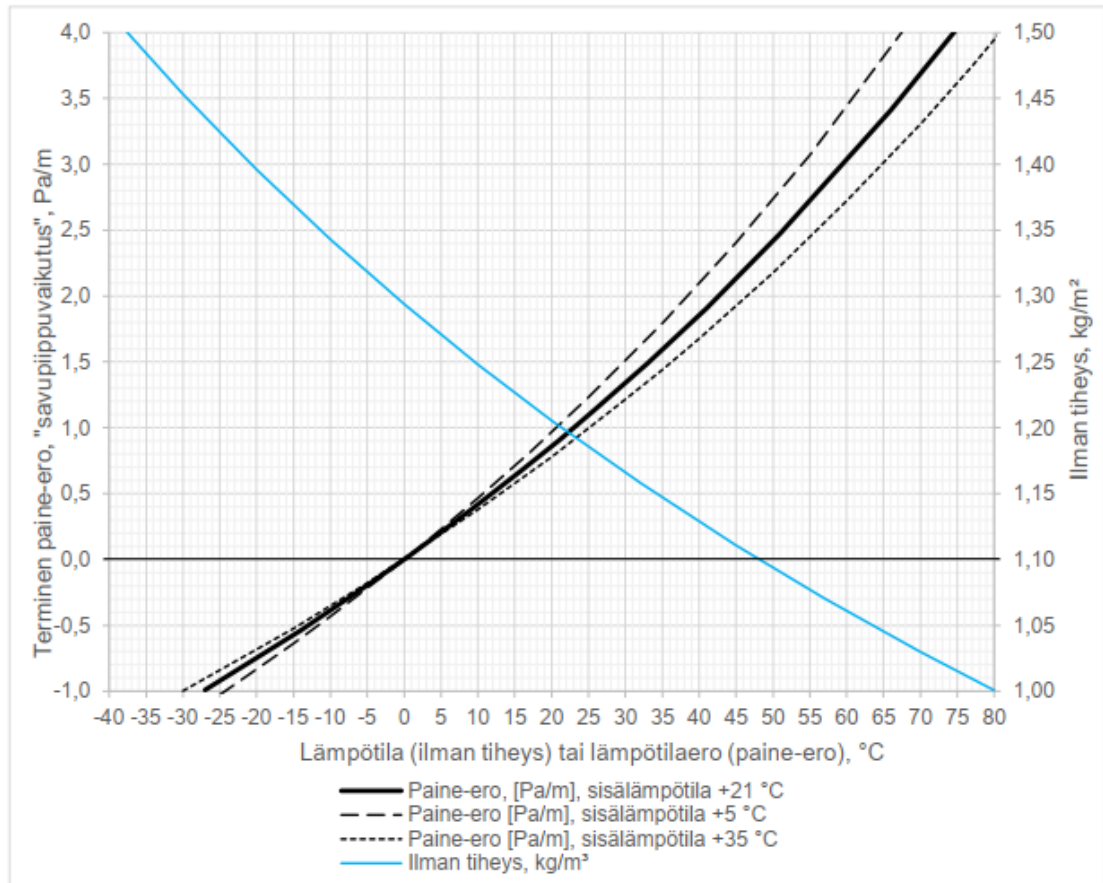
$\Delta p_{korjattu}$  = laskennallisesti määritetty paine-ero 1,0 m korkeudella lattiasta (Pa)

$\frac{\Delta p}{\Delta h}$  = termien paine-ero (Pa/m) Kuva 10

$h_0$  = paine-eron referenssitason korkeusasema (m)

$h_1$  = mittauskorkeus (läpiviennin korkeusasema) (m)

(Björkroth & Eskola 2019, 28.)



Kuva 10. Terminen paine-ero ja ilman tiheys eri lämpötiloissa (Björkroth & Eskola 2019, 28)

### 3.1.3 Seurantamittaus

Seurantamittauksella tarkoitetaan paine-eron 1–2 viikon mittausjaksoa, joka toteutetaan tallentavalla mittalaitteella. Mittausjakso tulisi ulottaa kestävästi viikonlopun yli. Seurantamittauksen avulla voidaan määrittää mittausjakson keskimääräinen paine-ero, ilmanvaihdon toiminta eri käyntiajoilla ja sääolojen ja rakennuksen käytön vaikutus paine-eroihin. Seurantajaksolta tulosten tulokinnan kannalta on oleellista tietää, kuinka ilmanvaihtolaitteita on jakson aikaan ohjattu. (Björkroth & Eskola 2019, 29.)

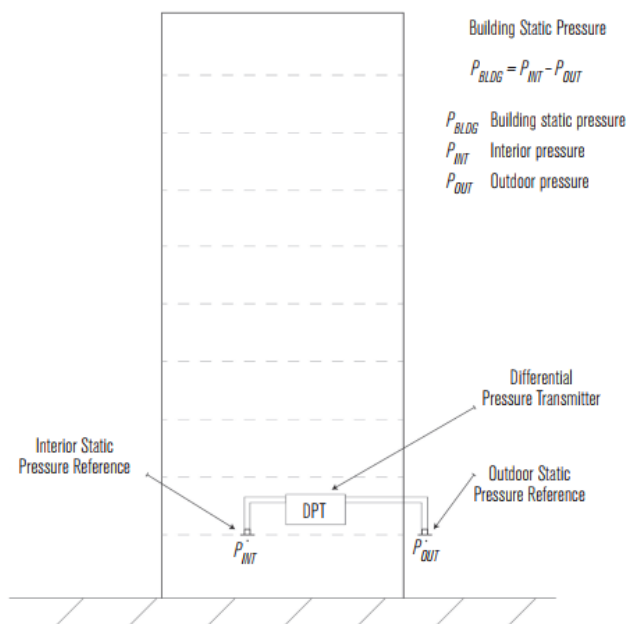
Mittalaitteen tarkkuuden vaatimukset ovat seurantamittauksille samat kuin hetkellisten paine-eron mittalaitteelle. Mittalaitteen tulee kyetä tallentamaan mittauksia 1 minuutin välein koko mittausjakson ajalta eli viikon mittausjaksolla noin 10 000 näytettä. Mikäli seurantamittauksen ulkoreferenssin taso poikkeaa tavoitetasosta, voidaan korjauslaskennassa käyttää kohteesta mitattua lämpötilaa tai lähimmän sääaseman tietoja, kun vähintään tuntikohtaiset arvot ovat saatavilla. (Björkroth & Eskola 2019, 29.)

### 3.1.4 Jatkuva mittaus

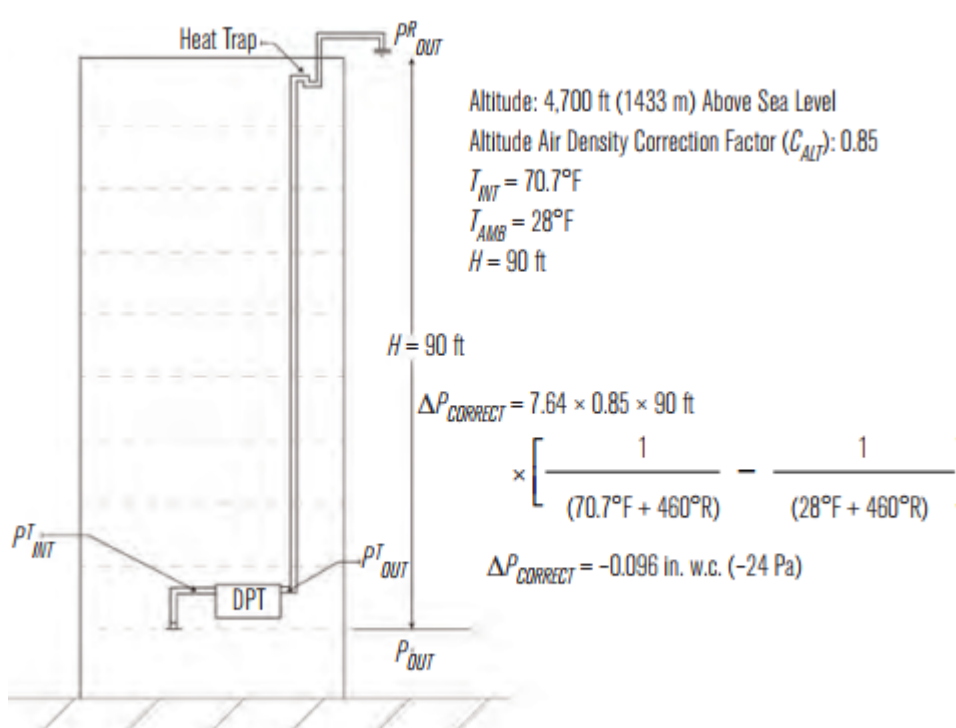
Jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä on suositeltava asentaa uudisrakennuksiin ja tiivistyskorjattuihin rakennuksiin. Mittausjärjestelmää voidaan hyödyntää paine-erojen pysyvyyden valvonnassa ja ilmavirtojen säätötyössä. Lisäksi mittauksilla voidaan saada monia ilmanvaihdon toimintahäiriöitä ilmi, joita ei muilla ilmanvaihtokoneissa olevilla mittauksilla havaittaisi. (Björkroth & Eskola 2019, 33–34.)

### 3.1.5 Savupiippuvaikutus paine-erolähtetimen impulssiputkessa

Rakennuksen sisällä kulkevan paine-erolähtetimen impulssiputken lämpötila on hyvin lähellä rakennuksen sisälämpötilaa. Suurilla ulkoilman ja sisäilman lämpötilaeroilla sisäpuoliseen impulssiputkeen muodostuu savupiippuvaikutus. Kuvan 11 mukaisesti ideaali paikka anturin sijoittamiseen olisi siten, että anturi sekä sisä- ja ulkoimpulssiputket olisivat samassa korkeudessa. Mikäli anturi sekä sisä- ja ulkoimpulssiputket sijaitsevat eri korkeusasemissa, tulee mittaus- tulosta korjata kuvan 12 mukaisesti (Rickhard 2016, 27–28).



Kuva 11. Ideaali paikka paine-ero lähtetimen sijoittamiselle (Rickhard 2016)



Kuva 12. Paine-eromittauksen korjaus, kun ulko- ja sisäreferenssi sijaitsevat eri korkeusasemassa (Rickhard 2016).

Impulssiputkissa syntyvä hormivaikutus huomioitu tilan ja ulkoilman välinen todellinen paine-ero lasketaan seuraavasti:

$$\Delta p_{korjattu} = p_{mittattu} - p_{hormi} \quad (6)$$

jossa

$p_{mittattu}$  = paine-ero lähettimen mittaus

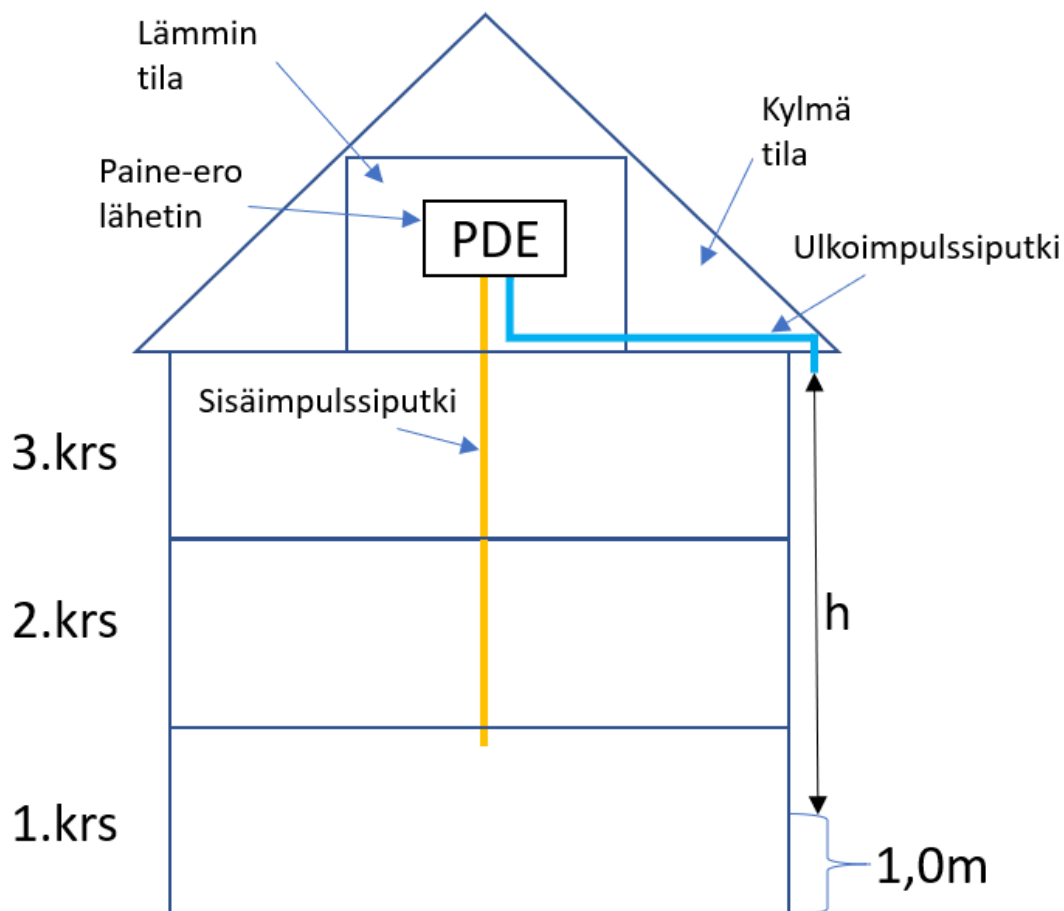
$p_{hormi}$  = ulko- ja sisäimpulssiputkissa hormivaikutuksesta syntyvä paine-ero.

Lasketaan kaavalla (3).

Kaavalla saadaan sama tulos kuin kuvan 12 kaavalla, mutta ilman yksiköiden muutosta SI-järjestelmään.

Korjauslaskentaa varten ulko- ja sisäimpulssiputkien korkeusasemat on mitattava tai määritettävä tarkasti käyttäen hyväksi esimerkiksi leikkauskuvien lattioiden korkeusasemia. Huonetilassa impulssiputken pää voi sijaita esimerkiksi alas lasketun katon pinnassa. Asennuspaikka on luonteva eikä edellytä vaikeasti toteutettavia rakennusteknisiä töitä 1,0 m asennuskorkeuteen verrattuna. Rakennusten paine-erojen mittausohjeessa mainitaan, että mittaukset tulisi korjata vastaamaan paine-eroa 1,0 m korkeudella (Björkroth & Eskola 2019,

29). Tästä syystä paine-eron korjauslaskennassa käytetään horminkorkeutena,  $h$  ulkoimpulssiputken ja mitatun tilan lattiatason +1,0 m korkeuseroa kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13. Paine-eron korjauslaskennassa käytettävän hormin korkeuden,  $h$  määrittäminen

### 3.1.6 Soveltuvia mittalaitteita

Paine-eron hetkellisiin- ja lyhyisiin seurantomittauksiin soveltuvat kevyet, kätevästi sopivat ja näytölliset laitteet, kuten kuvan 14 monitoimimittari.



Kuva 14. TSI Velocicalc 9565 Monitoimimittari (Teknocalor Oy)

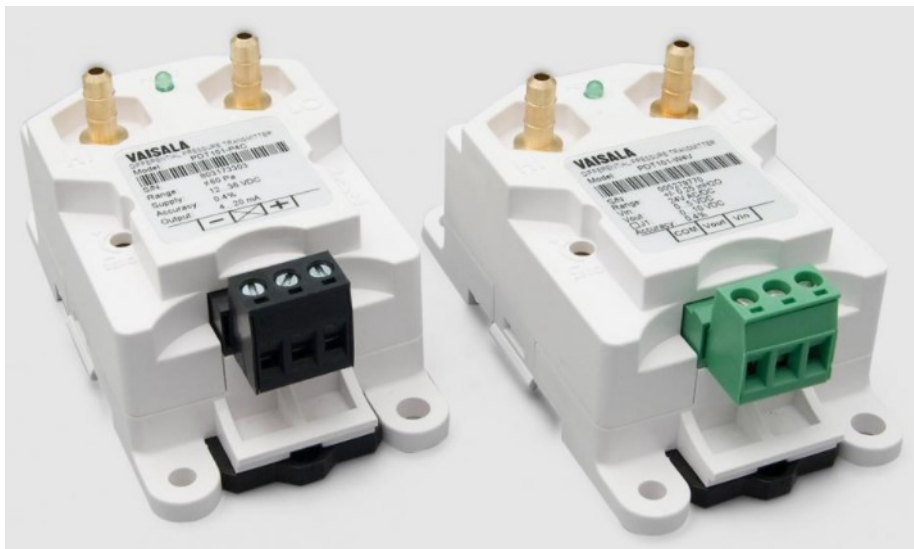
Jatkuvaan ja pidempään seuranta mittaukseen soveltuvat tyypillisesti paine-erolähetimet, jotka antavat mittaustuloksen standardimuotoisena sähköisenä ulostulona. Näin ollen ne voidaan liittää erilaisiin mittaus- ja automaatiojärjestelmiin.

Kuvassa 15 näkyvä Produl PEL-N on ilmanvaihtojärjestelmien paineiden ja paine-erojen mittaamisen tarkoitettu paine-erolähetin. Lähettimessä on automaattisesti toistuva nollaus, jonka avulla nollapiste pidetään täsmällisenä. Tämän vuoksi uudelleen kalibrointia ei yleensä tarvita. N-kirjain mallinimessä tarkoittaa näytöllistä versiota. (Produal Oy 2021).



Kuva 15. Produal PEL-N paine-erolähetin (Produal Oy)

Kuvassa 16 näkyvä Vaisala PDT101 -paine-erolähetin on suunniteltu erityisesti vaativiin puhdistilasovelluksiin. Laite tarjoaa tarkan, herkän ja vakaan mittauksen, joka on luotettava ja toistettavissa. (Vaisala Oy 2021.)



Kuva 16. Vaisala PDT101 -Paine-erolähetin (Vaisala Oy)

Ilmamäärälähettimet ovat laitteita, joiden toiminta perustuu paine-eron mittamiseen. Paine-eron ja syötettävän K-arvon perusteella laite laskee ilmantilavuusvirtauksen. Sen kanssa voidaan käyttää erilaisia mittausantureita tai säätöpeltejä (HK Instrument Oy 2021). Kuvassa 17 on esitetty HK Instrumentin valmistama DPT-Flow ilmamäärälähetin.





Kuva 17. HK Instrument DPT-Flow -ilmamäärälähetin (HK instrument Oy)

### 3.2 Rakennusautomaatiojärjestelmä

Rakennusautomaatio on ohjausjärjestelmä rakennusten taloteknisille järjestelmille, kuten ilmanvaihto, lämmitys ja valaistus. Rakennusautomaation avulla rakennukseen luodaan tavoitellut olosuhteet pyrkien pitämään energian käyttö optimaalisena.

Kuvasta 18 nähdään, että rakennusautomaatiojärjestelmä jakaantuu kolmeen eri tasoon. Valvomotaso voi toimia joko yksittäisen tai useamman kiinteistön valvontaa varten, josta käyttäjä voi nähdä rakennusten taloteknisten järjestelmän toiminnan. Käyttäjä saa valvomon kautta tiedon hälytyksistä, voi tehdä muutoksia esim. aikaohjelmiin ja asetusarvoihin, seurata järjestelmien toimintaa graafisten prosessikuvien kautta sekä analysoida kerättyä historiadataa. (Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018, 60.) Valvomotason valvomo-ohjelmistot voivat sijaita joko paikallisilla tietokoneilla tai etäkäyttöisenä esim. pilvialustoilla. Nykyaikaisten valvomo-ohjelmien käyttö on mahdollista useilla eri päätelaitteilla, kuten tietokoneilla, tableteilla ja älypuhelimella.

Automaatiotasolla ala-asetat hoitavat prosessien ohjausta I/O-pisteisiin tai kenttäväylillä liitettyjen kenttätason kenttälaitteiden välityksellä (Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018, 60–61).

Kenttätason laitteita ovat ensisijaisesti antureita ja toimilaitteita. Antureilta saadaan tietoa prosessien tilasta ja olosuhteista, kuten lämpötiloista. Ala-asetat

hyödyntävät antureilta saadun tiedon ja ohjaavat prosessia toimilaitteiden välityksellä siten, että asetetut tavoitteet saavutetaan. (Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018, 60–61.)



Kuva 18. Rakennusautomaatiojärjestelmän tasot (Fidelix Oy)

### 3.3 Ilmanvaihdon automaatio

Ilmanvaihdon automaatio riippuu hyvin pitkälti rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmästä. Automaatiolla voidaan pääasiassa ohjata koneellisia ilmanvaihtojärjestelmiä, joita ovat koneellinen poisto, tulo- ja poistoilmanvaihto ja tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla. (Suomäki & Vepsäläinen 2017, 77.) Poistoilmanvaihtojärjestelmissä automaatiolla ohjataan tyypillisesti puhallinta käymään hitaalla tai nopealla nopeudella tarpeen tai aikaohjelman mukaisesti (Suomäki & Vepsäläinen 2017, 78).

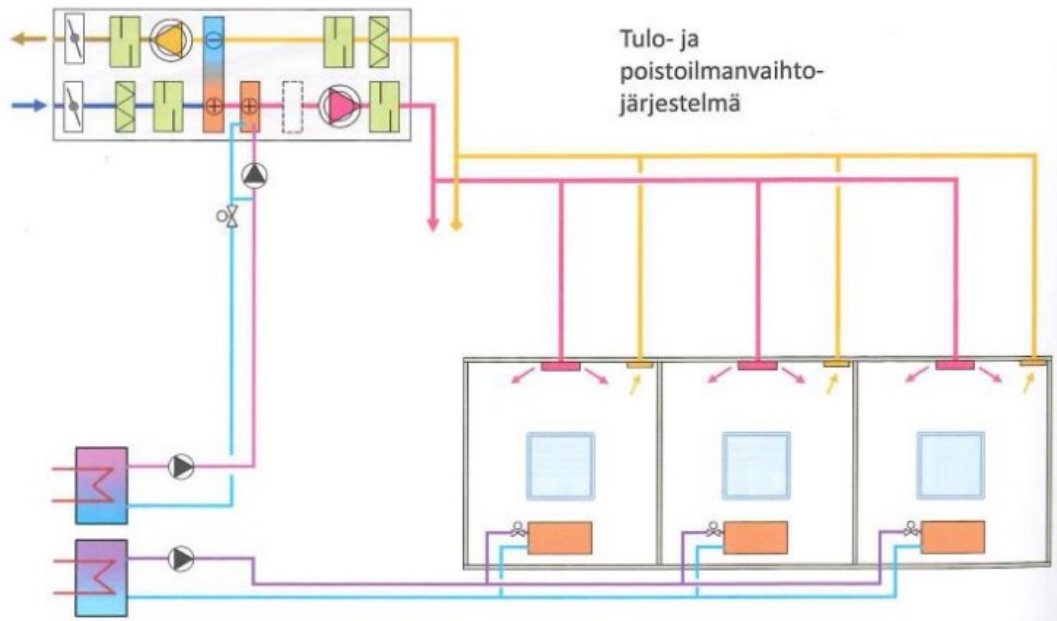
Tulo- ja poistoilmanvaihtokoneet sekä lämmöntalteenotolla että ilman ovat automaation osalta yhtenevät. Tulo- ja poistoilmanvaihtokoneen osalta automaatiolla säädetään pääasiassa tuloilman lämpötilaa sekä tulo- ja poistoilmamääriä.

Tuloilman lämpötilaa säädetään tyypillisesti ohjaamalla ensimmäisessä portaassa lämmöntalteenottolaitteen tehoa ja toisessa portaassa lämmityspatterin

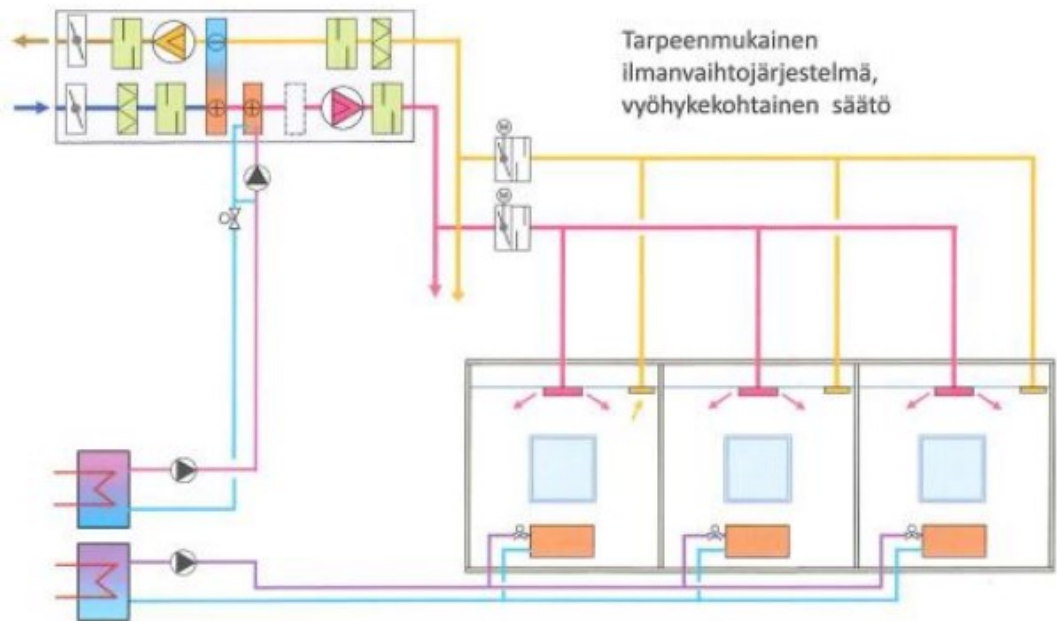
tehoa pyrkien pitämään lämpötila asetusarvossaan. Tuloilman asetusarvo on usein riippuvainen poisto- tai huoneilmanlämpötilasta. Näin tuloilman lämpötilaa muutetaan pyrkien pitämään huonetilan lämpötila tasaisena riippumatta tilan mahdollisista muuttuvista lämpökuormista.

Ilmanvaihtokoneen ilmamäärän säätö on riippuvainen ilmanvaihtokoneen puhaltimista. Puhaltimet voivat olla joko yksi- tai kaksinopeus tai portaattomasti säädettäviä puhaltimia. Yksinopeuspuhaltimilla varustetulla ilmanvaihtokoneessa automaatiolla ohjataan puhaltimet päälle tai pois. Kaksinopeuspuhaltimilla varustetulla ilmanvaihtokoneella voidaan puhaltimia ohjata lisäksi käymään joko hitaalla tai nopealla nopeudella. Molemmissa ratkaisuissa ilmanvaihtokoneen puhaltimien tuottama ilmamäärä on riippuvainen puhaltimien mekaanisista ominaisuuksista. Portaattomasti säädettävillä puhaltimilla automaatiolla voidaan ohjata puhaltimien pyörimisnopeutta, joka vaikuttaa puhaltimen tuottamaan ilmamäärään. Tyypillisesti puhaltimen pyörimisnopeutta ohjataan staattisen kanavapainemittauksen perusteella pyrkien pitämään kanavapaine asetusarvossaan. Vakioilmavirtajärjestelmissä voidaan myös käyttää puhaltimien säädössä vakiopyörintänopeuksia tai säätää puhaltimen pyörintänopeutta puhaltimen ilmamäärämittauksen perusteella.

Ilmanvaihtojärjestelmä voi olla joko vakioilmavirralla toimiva tai muuttuvalla ilmavirralla toimivia. Vakioilmavirtajärjestelmässä (CAV = Constant Air Volume System) ilmavirtaa pystytään säätämään ainoastaan ilmanvaihtokonekohtaisesti muuttamalla puhaltimien pyörintänopeutta, kuten kuvassa 19 on esitetty. Kuvasta 20 nähdään, kuinka muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä (VAV = Variable Air Volume System) ilmavirtoja voidaan säätää vyöhykekohtaisesti. Muuttuvailmavirtajärjestelmässä on mahdollisuus säätää ilmamääriä jopa huone kohtaisesti. (Sandberg 2014, 126–133.)



Kuva 19. Vakioilmavirtajärjestelmän periaatekuva (Sandberg 2014, 126)



Kuva 20. Muuttuvailmavirtajärjestelmän periaatekuva (Sandberg 2014, 127)

### 3.4 Ilmanvaihtokoneen ilmamäärän säätö vaipan yli olevan paine-eromittauksen perusteella

Kuopion yliopiston seitsemän pientaloa käsittävässä tutkimuksessa tutkittiin koneellisella tulo- ja poistoilmalla varustettujen pientalojen muodostuneita paine-eroja ja paine-eroon vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa arvioitiin kehitetyn ilmanvaihdon paine-erosäädön käyttökelpoisuutta paine-erojen säätöön ja radonin torjuntaan tiiveydeltään erilaisissa taloissa. Paine-erosäätö (DDC) pyrki pitämään paine-eron määritellyssä arvossa paine-eroon vaikuttavien tekijöiden muuttuessa, ilmanvaihtotehoa muutettaessa, ja kuten liesituuletinta

käytettäessä. Sääto tapahtui siten, että painesäätimen ohjausviestit muuttivat puhaltimien jännitesäätimien ulostulojännitettä kymmenessä portaassa. Ulostulojännitteen muutos sai aikaan puhaltimien kierrosnopeuden muutoksen ja vastaavasti ilmamäärän muutoksen. Alipaineisuuden lisääntyessä tuloilmapuhaltimen teho kasvoi. Poistopuhaltimen teho laski, jos tuloilmapuhaltimen teho ei riittänyt. Alipaineisuuden vähentyessä toiminta oli päinvastainen. Painesäätimestä voitiin rajoittaa painesäädön ilmamäärän vaihtelualueetta eri ilmanvaihtototehoilla. Toteutettu paine-erosäätö toimi teknisesti moitteettomasti tutkimuskohteissa. Järjestelmän käyttökelpoisuutta rajoitti rakennusten huono tiiveys, jolloin paine-erosäädön kohtuullisilla ilmanmäärien muutoksilla ei saatu riittävää muutosta paine-eroon. Tutkitut kohteet edustivat tyypillistä rakentamisaikakohdan 80–90-luvun tiiveyttä, mikä nykyisin yleistyneisiin tiiviisiin ( $n_{50} < 1$ ) taloihin verrattuna on tiiveydeltään heikkoa tutkimuskohteiden vuotoluvun  $n_{50}$  vaihdellessa 3,1–8,6 (1/h). (Keskikuru 2018.)

## **4 TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄ**

Tutkimusaineistona käytettiin pääosin tutkimuskohteen rakennusautomaatiojärjestelmän avulla kerättyä mittausdataa. Tämän lisäksi mittausdataa on kerätty myös muilla mittalaitteilla. Aineiston keräyksessä ja menetelmissä mainittujen mittalaitteiden tarkemmat tiedot ja tarkkuudet on esitetty liitteessä 2.

### **4.1 Tutkimuskohte**

Tutkimuskohteena on kuvassa 21 näkyvä Senaatin omistama toimistokiinteistö Kuopion keskustassa. Kolmikerroksinen yhtenäinen rakennus koostuu neljästä osasta A, B, C ja D. Tutkimuksen aikana kiinteistö oli osaltaan tyhjänä ja osaksi käytössä.



Kuva 21. Kuopion verotalo (Projektiutiset 2011)

Rakennus on alun perin rakennettu vuonna 1928, ja sitä on laajennettu 1950-luvulla. Ensimmäinen peruskorjaus rakennukseen on tehty 1980-luvulla. Nykyiseen muotoon rakennus on tullut 2010 toteutetun peruskorjauksen ja laajennuksen yhteydessä. (Projektiutiset 2011.)

Viimeisimmän peruskorjauksen yhteydessä rakennus on tiivistyskorjattu ja talotekniikka on uusittu.

Rakennuksen ullakkotila on räystäältä tuulettuva jokaiselle julkisivulle.

#### **4.2 Tutkimuskohteen ilmanvaihtojärjestelmä**

Tutkimuskohteen ilmanvaihtojärjestelmä koostui yleisilmanvaihdon viidestä tulo- ja poistoilmavaihtokoneesta sekä erillispoistoista, joilla poistetaan ilmaa porraskäytävistä ja wc-tiloista. Kolmikerroksinen rakennus on jaettu neljään osaan A, B, C ja D ja yksittäinen tulo- ja poistoilmavaihtokone palvelee yksittäistä rakennuksen osaa. Yksi ilmanvaihtokone palvelee kellarikerrosta. Palvelualueet ilmanvaihtokoneittain:

- 301TK C-osa
- 302TK B-osa
- 303TK A-Osa
- 304TK Kellari
- 305TK D-osa

Kohteen ilmanvaihtojärjestelmää voidaan pitää muuttuvailmavirtajärjestelmänä, koska osaa palopeltiryhmiä käytetään vyöhykepelteinä. Ilmanvaihtoa

voidaan käyttää normaalin käyttöajan ulkopuolella tarpeenmukaisesti käynnistämällä vyöhykkeen ilmanvaihto lisäaikapainikkeesta, jolloin myös kyseisen vyöhykkeen palopellit aukenevat. Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien pyörintänopeutta, ja sitä kautta ilmamääriä säädettiin kanavapainemittausten perusteella.

Kohteessa oli valmistumisen jälkeen havaittu ongelmia suuren alipaineen johdosta. Ilmanvaihtokoneiden ilmamääriä oli säädetty 2013 vuoden lopulla hyödyntäen vaipan yli olevia paine-eromittauksia. Paine-erojen seurantamittausjakso sisälsi mittauksia ennen ja jälkeen ilmamäärien säädön. Ennen ilmamäärien säätöä rakennus oli ollut -20...-30Pa alipaineinen ja säädön jälkeen rakennuksen alipaineisuus oli saatu muutettua normaaliksi 0...-10Pa:ksi. Samassa yhteydessä käyttöajan ulkopuolisista ilmanvaihtokoneiden osatehokäyttöistä oli siirrytty jaksottaiskäyttöön.

#### **4.3 Tutkimuskohteeseen toteutetut muutokset aineiston keräystä varten**

Tavoitteissa asetettujen tutkimusongelmien selvittämiseksi rakennuksen eri ilmanvaihtokoneiden palvelualueille oli lisättävä kattava määrä paine-ero lähettäjiä. Tarkan kuvan saamiseksi paine-erojen käyttäytymisestä oli jokaiseen rakennuksen neljän osan ilmanvaihtokoneen palvelualueelle asennettava paine-erolähettäjiä. Olettamuksena myös oli, että eri kerroksien paine-erot eivät ole yhteneviä, joten tästä syystä paine-erolähettäjiä olisi asennettava jokaiseen kerrokseen. Tarkoituksena oli pystyä säätämään jokaista palvelualueen ilmanvaihtokonetta omanaan. Näiden lisäksi paine-eroa mitattiin vaipan yli kahdelta eri julkisivulta, jotta paine-erosäädössä käytettävää mittausta voitaisiin vaihtaa tuleen suunnan mukaisesti. Näin päädyttiin siihen, että paine-eroa mitataan jokaiselta neljältä ilmanvaihdon palvelualueelta kaikista kolmesta kerroksesta kahdelta eri julkisivulla. Paine-eroa mitataan sisällä käytävöistä.

Saadakseen tietoa paine-ero säädön vaikutuksesta ilmanvaihtokoneiden ilmamääriin oli niihin lisättävä tulo- ja poistopuhaltimille ilmamäärämittaukset. Tuulen suunnan mukaisesti säädössä käytettävän paine-eromittauksen valintaa varten kohteeseen asennettiin rakennuksen katolle tuulianturi, josta saadaan

tieto tuulen nopeudesta ja suunnasta. Esitellyt mittaukset ovat liitetty rakennuksen olemassa olevaan rakennusautomaatiojärjestelmään.

#### **4.3.1 Rakennusautomaatiojärjestelmä**

Kohteessa oli Fidelix Oy:n toimittama rakennusautomaatiojärjestelmä, joka koostui Webvision-valvomokoneesta ja neljästä FX-2025-ala-asemasta. Tutkimushankkeen yhteydessä ala-asemiin lisättiin paine-ero- ja ilmamäärämittauksia varten tarvittava määrä I/O-moduuleita. Mittausdatan tallentamista varten tutkimushankkeen ajaksi kohteeseen lisättiin toinen Webvision-valvomotietokone.

#### **4.3.2 Paine-erolähttimet**

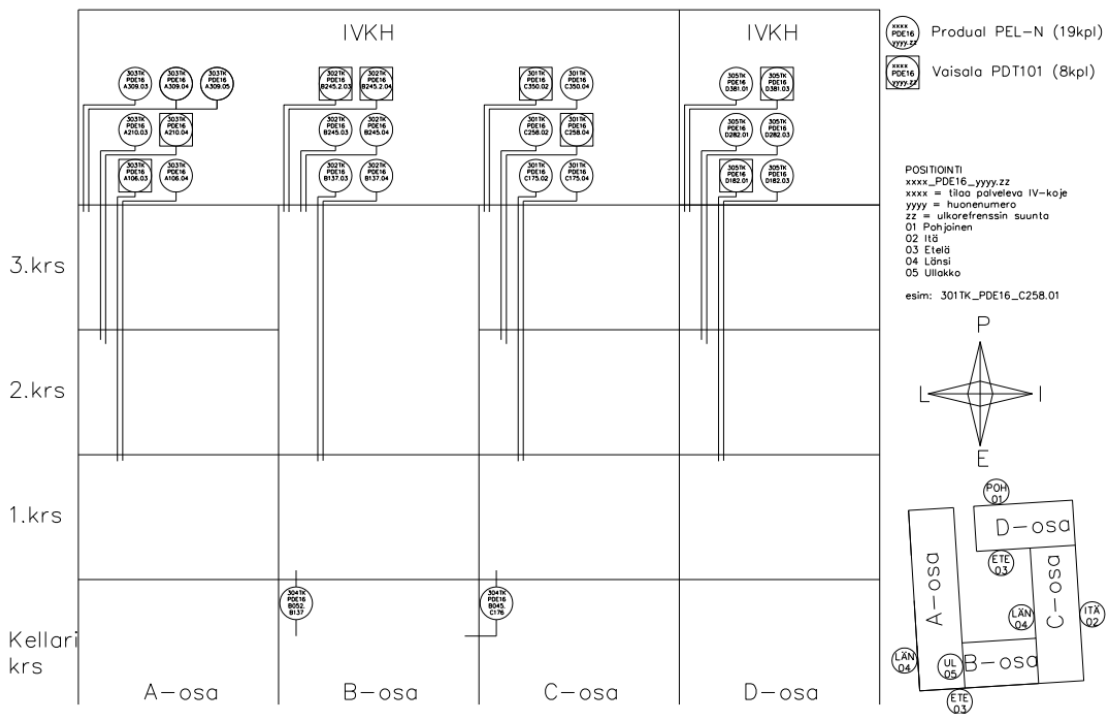
Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron mittaamiseen käytettyjen lähttimien valinta perustui seuraaviin vaatimuksiin:

1. Mittausalue vähintään  $\pm 50$  Pa
2. Tarkkuus vähintään  $\pm 0,5$  Pa
3. Yleisesti saatavilla
4. Mittaustekniikka sallii pitkän impulssiputken pituuden

Vaatimusten perusteella käytettäviksi paine-ero lähttimiksi valikoitu Proidualin valmistama PEL-N- ja Vaisalan valmistama PDT101 paine-erolähtetin. Kuvassa 22 on esitetty kohteeseen asennettujen paine-erolähttimien sijainti. Paine-erolähttimiä asennettiin yhteensä 27 kpl, joista 19 kpl oli Proidual PEL-N mallisia ja 8 kpl oli Vaisalan PDT101 -mallisia. Jokaiseen ilmanvaihtokoneen palvelualueen kerrokseen tuli 2 kpl mittauksia, joiden ulkoreferenssit sijaitsivat rakennuksen eri julkisivuilla. Kolmikerroksisen rakennuksen jokaiselle osalle tuli 6 kpl paine-eromittausta. A-osalla mittauksia asennettiin 7 kpl, koska 3. kerrokseen on sijoitettu ylimääräinen paine-erolähtetin, jonka referenssi on sijoitettu tuulettuvaan ullakkotilaan. Tällä ratkaisulla saadaan kerättyä mittausdataa ulkoreferenssin asennuspaikan vertailua varten. Vaisalan PDT101:n mittauspaikat valittiin satunnaisesti lukuun ottamatta B-osan 2 kerrosta. Kahden valmistajan paine-erolähttimien vertailua varten kerrokseen asennettiin neljä lähetintä. Vaisalan ja Proidualin paine-erolähttimet on kytketty rinnankytkennällä paine-eroimpulssiputkiin. Kaksi lähetintä mittaa paine-eroa samasta tilasta ja samasta ulkoreferenssistä. Lähetinpareja on sekä etelän että lännen puolelle sijaitsevin ulkoreferenssein. Ulkovaipan yli olevien



paine-eromittauksien lisäksi kohteeseen asennettiin 2 kpl paine-erolähettä, jotka mittaavat paine-eroa kellarin ja 1.kerroksen välillä. Näillä mittauksilla haettiin varmistaa, että alipaineistettu kellarikerros on todellisuudessa alipaineinen 1. kerrokseen nähden.



Kuva 22. Leikkauskuva paine-erolähettimien sijoituksista

Paine-erolähettimien asennus valmisteltiin etukäteen tekemällä jokaiselle rakennuksen osalle oma mittausmoduuli. Moduuliin pohjana toimii vanerilevy, johon asennettiin tarvittavat paine-erolähettimet. Paine-erolähettimet kaapeloitiin valmiiksi moduulilla olevalle kalvorasialle. Ulkoreferenssi-impulssiputket yhdistettiin siten, että moduulin kolmella mittauksella on yhteinen ulkoreferenssi. Kohteessa asennettaessa moduulia ei tarvitse kuin yhdistää 2 kpl ulkoreferenssiä ja huonetilojen impulssiputket. Paine-ero lähettimet valmisteltiin käyttökuntoon asettamalla Vaisalan lähettimistä ulostulo 0-5V:stä 0-10V:n sekä Produalin lähettimistä valitsemalla mittausalueeksi  $\pm 50$  Pa ja aikavakioksi 2 s. Näin eri valmistajan asetukset ovat mahdollisimman lähellä toisiaan ja lähettimien vertailu keskenään selkeämpää.

Paine-erolähettimien laiteposiointi on toteutettu seuraavasti:

xxxx\_PDE16\_yyyy.zz

, jossa

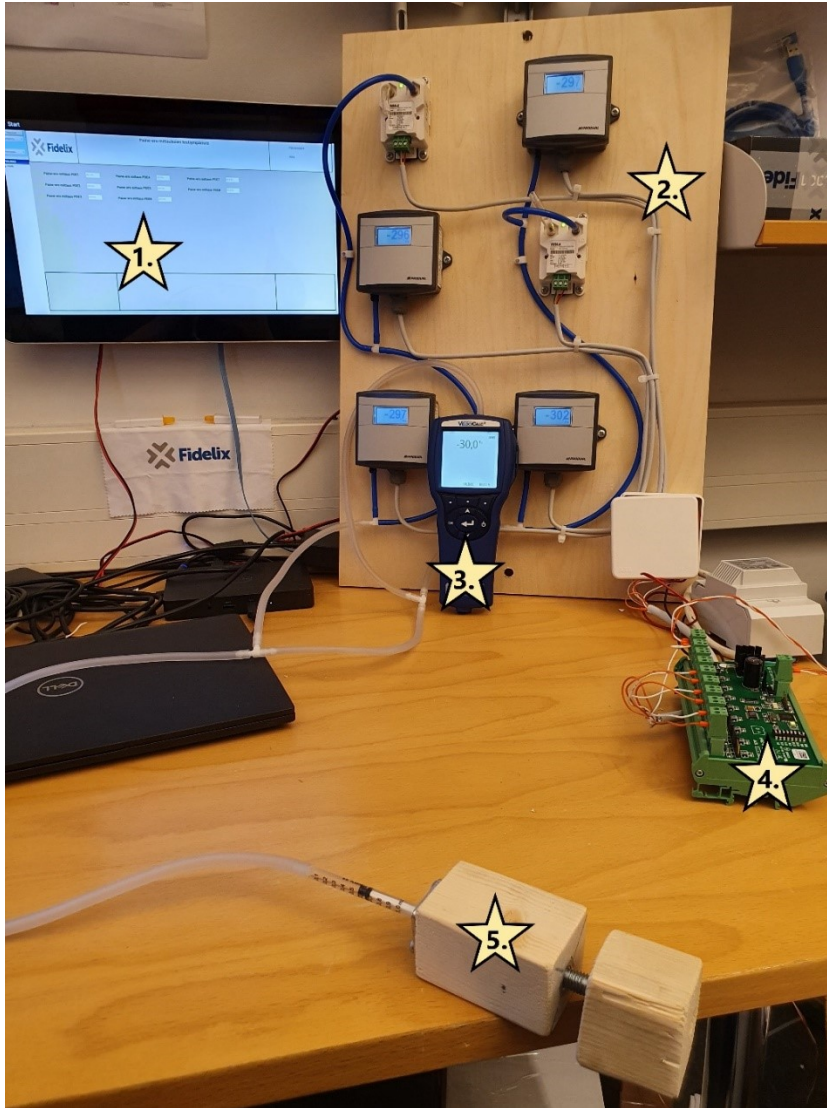
xxxx= tilaa palveleva Ilmanvaihtokone

yyyy= mitattavan tilan tilatunnus

zz=mittauksen ulkoreferenssin suunta: 01=Pohjoinen, 02=Itä, 03=Etelä, 04=Länsi ja 05=Ullakko

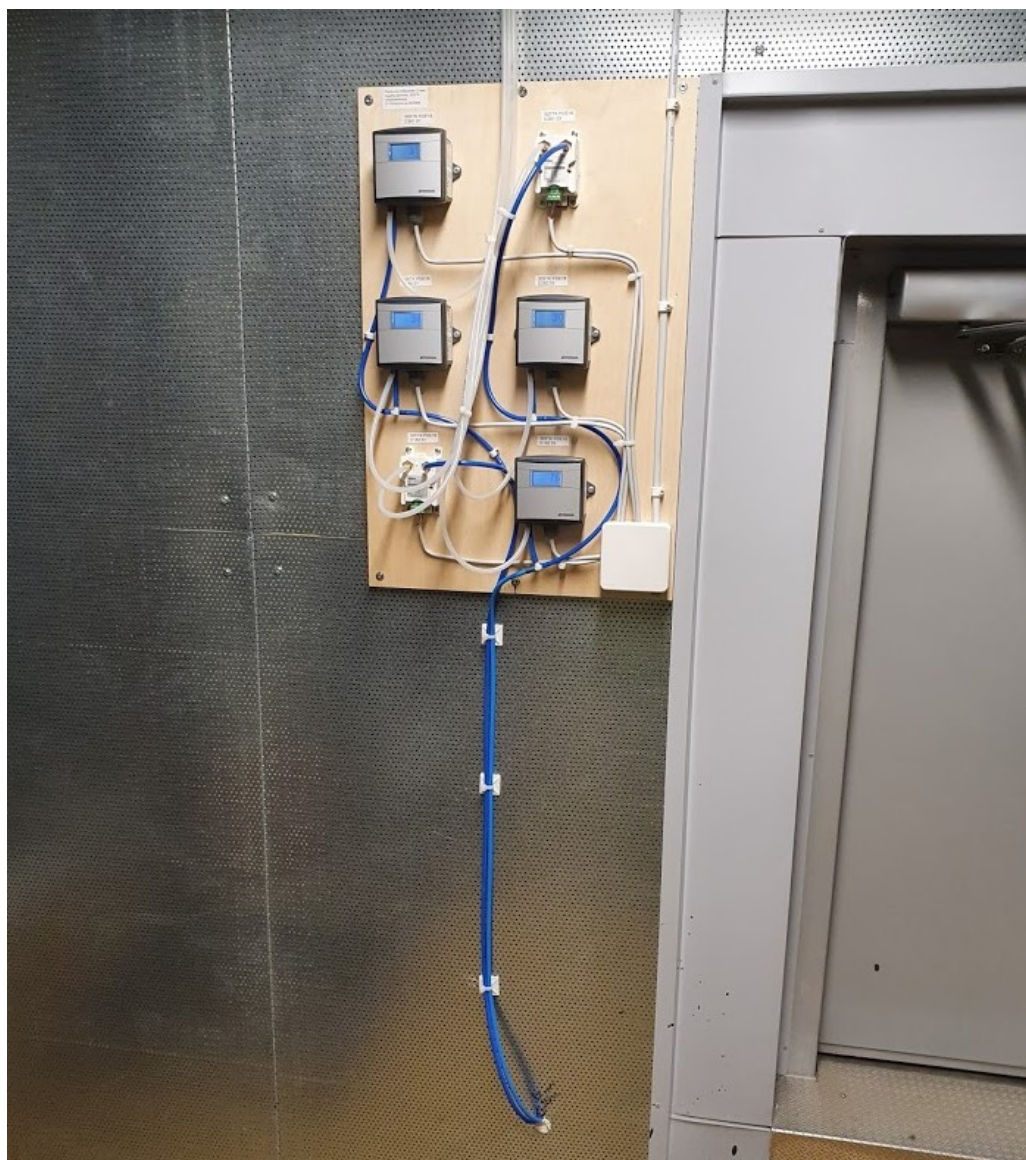
Tällä positiointimenetelmällä saadaan selville kaikki tarpeellinen tietoa ilman tukeutumatta dokumentointiin. Positio kertoo, mistä tilasta paine-eroa mitataan, mikä on laitteen ulkoreferenssin sijainti ja mikä ilmanvaihtokone palvelee tilaa. Kohteessa laitteet merkittiin siten, että laitepositio löytyy sekä laitteesta että huonetilan impulssiputkien yhteydestä.

Ennen asennusta mittausmoduulit testattiin kuvan 23 mukaisella testikokoonpanolla, jotta voitiin varmistua niiden toimivuudesta. Osana testijärjestelmää oli kuvasta puuttuva Fidelix FDX Compact F-X3000-C -keskusyksikkö, joka lukee IO-kortilta mittauksen ja esittää sen näytöllä. Testauksessa jokainen mittausmoduuli testattiin vakioaineilla: -30 Pa, -20 Pa, -10 Pa, 0 Pa, 10 Pa, 20 Pa ja 30 Pa.



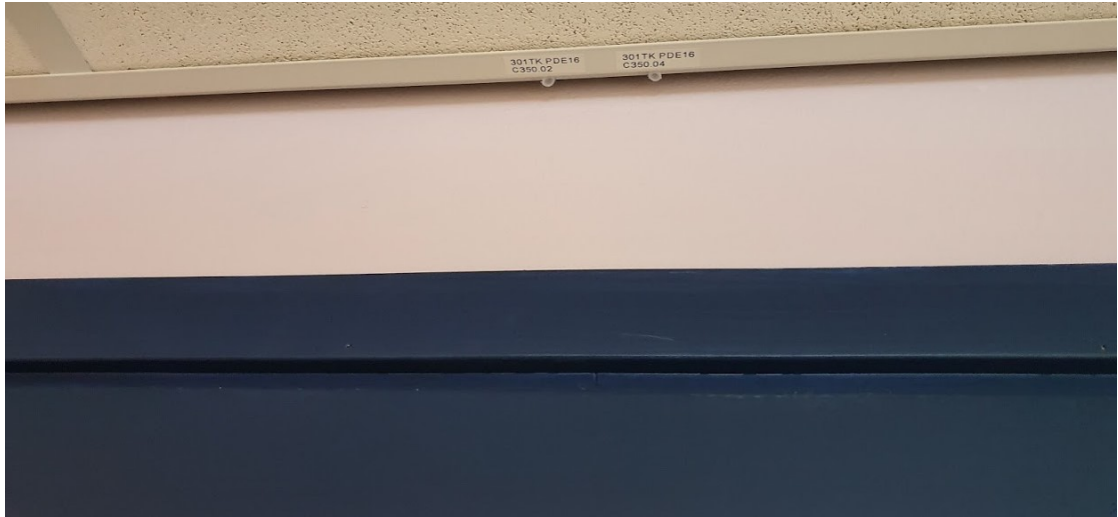
Kuva 23. Paine-ero mittausmoduulien testausjärjestelmä. 1. Fidelix Visio 15C -näyttö, 2. mittausmoduuli, 3. Kalibroitu mittalaite, 4. Fidelix AI-8 -sisääntulokortti, 5. Vakiopainelähde

Paine-eromittausmoduulit asennettiin A-, B- ja D-osalla ilmanvaihtokonehuoneiden seinille kuvan 24 mukaisesti. C-osalla moduuli asennettiin ullakkotilassa olevaan teletilan seinälle. Kaikki tilat, joihin lähettämiä on asennettu, ovat lämpimiä ja sijaitsevat rakennusten varsinaisten käyttökerrosten yläpuolella. Paine-ero mittausten impulssiputkina käytettiin Toppi Oy:n ToppTube™ PA11P40 6/ 4 mm pneumatiikkaputkea. Ulkoreferenssien impulssiputket ovat väriltään sinisiä, ja huonetilojen putkituksista käytettiin läpinäkyvää putkea. Käyttämällä erivärisiä putkia voidaan visuaalisesta havaita nopeasti putken käyttötarkoitus. Jokaiselle paine-eron mittausmoduulille tuli ulkoreferenssien impulssiputket kahdelta eri julkisivulta ja paine-erolähettimien määrää vastaava määrä huonetilojen mittaamisen käytettäviä sisäimpulssiputkia.



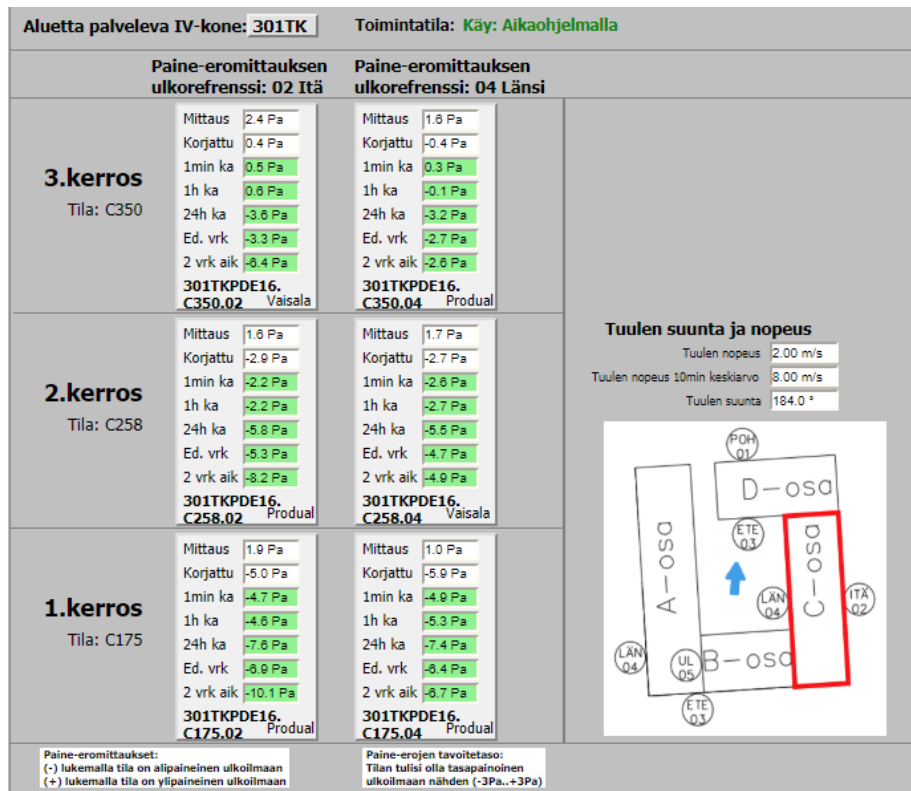
Kuva 24. D-osan vaipan yli olevat paine-eromittaukset.

Sisäpuoliset impulssiputkitukset on tehty siten, että ne kulkevat kokonaisuudessaan lämpimässä tilassa. Pystynousut kulkevat pääasiassa sähkökeskusten yhteydessä olevissa kUILUissa. Putkitukset on tuotu sähkökeskustilasta haluttuun käytävä tilaan, josta kerroskohtainen mittaus on suunniteltu mitattavan kuvan 25 mukaisesti. Sisäimpulssiputkien putkitukset on tehty siten, että jokaisesta tilasta, jonka paine-eroa mitataan, menee kaksi putkea kyseisille paine-erolähettimille, joiden ulkoreferenssit ovat rakennuksen eri julkisivuilla.



Kuva 25. Paine-ero mittaus impulssiputkien tuonti huonetilaan huomaamattomasti alakattorungossa. Laittepositiointi on sijoitettu impulssiputken välittömään läheisyyteen.

Rakennusautomaatiojärjestelmässä mittauksista laskettiin keskiarvot minuutille, tunnille ja 24 tunnille, kuten kuvasta 26 voidaan nähdä. Näiden lisäksi grafiikalla esitetään myös edellisen ja sitä edellisen vuorokauden keskiarvot.



Kuva 26. Rakennusautomaatiojärjestelmän näkymä mittauksista C-osalta

Vertailumittauksista saatujen tulosten perusteella lisäsimme kiinteästi asennetut vertailupaine-erolähtetimet A-osan 1.krs ja D-osan 2.krs mittaamaan paine-eroa suoraan ikkunarasta siten, että ulkoimpulssiputken korkeus on hyvin lä-

hellä paine-erolähtetimen korkeutta kuten kuvasta 27 voidaan nähdä. Kohteessa oli ennestään langattomia lämpötilalähtetimiä, joten pystyimme hyödyntämään sen järjestelmän vastaanottimia ja samaan vertailumittaukset rakennusautomaatiojärjestelmään ilman mittavia kaapelointi töitä. Rakennuksen yläosassa sijaitsevien paine-erolähtetimen impulssiputkissa hormivaikutuksesta syntyvä paine-eron korjauslaskenta suoritetaan ala-asemassa ja näin saadaan reaaliaikaisesti todellinen vaipan yli oleva paine-ero.



Kuva 27. Kiinteästi asennettu vertailumittaus

### 4.3.3 Ilmamäärälähtetimet

Tutkimuksessa selvitettiin paine-erosäädön vaikutus ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistoilmamäärien vaihteluun. Tätä varten kohteen ilmanvaihtokoneiden tulo- ja poistoilmapuhaltimien ilmamäärien mittaamista varten asennettiin HK Instrumentin valmistamat DPT-Flow ilmamäärälähtetimet. Kohteen ilmanvaihtokoneissa oli tehdasasenteiset paikalliset ilmamäärämittarit, joten ilmamäärälähtetimen asennukseen riitti mittarin vaihtamien lähtetimeen ja lähtetimen kaapelointi ala-asemalle.

#### 4.3.4 Tuulianturi

Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron mukaisessa säädössä käytetyn paine-eromittauksen valinta suunniteltiin vaihtuvan tuulen suojaiselle seinälle tuulen mukaisesti. Säädön siirtyminen suojan puolelle sallitaan, kun tuulen nopeus ylittää 5 m/s ja tuulen suunta on ollut yli 10min suojan vastakkaiselta suunnalta. Rakennusautomaatiojärjestelmiin on nykyään mahdollista saada sääennuste- ja säähavaintodataa eri palveluntarjoajilta. Tätä sovellusta varten tarvittiin reaaliaikainen tieto tuulen suunnasta ja nopeudesta. Tämän vuoksi kohteeseen asennettiin tuulianturi. Tuulianturin valinta tehtiin aikaisempien kokemusten perusteella, ja anturiksi valikoitu Davis Instrumentin valmistama laite.

Tuulianturi asennettiin laitteen maahantuojalla Ilkka Lilja Oy:n ohjeistuksen mukaisesti rakennuksen katolle n. 6 m korkeuteen, kuten kuvasta 28 voidaan nähdä. Rakennuksen vanha letkutorni on ainut osa rakennuksesta, joka ylettyy tuulianturin korkeudelle. Tuulen mittauksen kannalta anturin olisi parasta olla avoimessa paikassa, jossa ei ole rakenteita, jotka voivat muuttaa tuulen suuntaa.



Kuva 28. Tuulianturi rakennuksen katolle asennettuna.

#### 4.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmät valittiin siten, että tavoitteissa asetettuihin kysymyksiin saadaan ratkaisu.

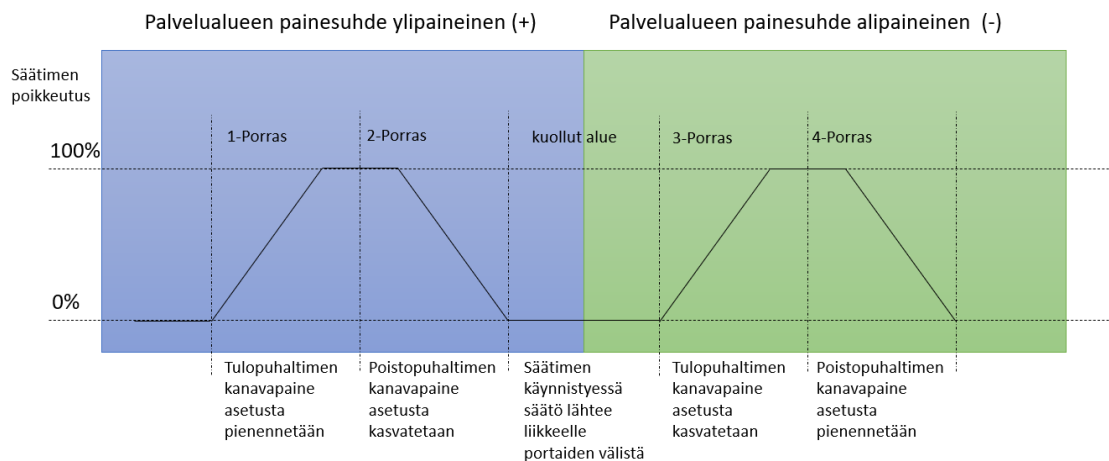
##### 4.4.1 Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron säätö

Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eromittauksen mukaisen säädön periaatteena on, että säädössä käytetään ilmanvaihtokoneen palvelualueelta mitattujen paine-erojen keskiarvoa, joiden ulkoreferenssi on tuulen suojan puoleisella seinällä. Paine-erojen keskiarvo lasketaan mitattujen lukemien 1 mi-



nuutin keskiarvoista. Säättöön vaikuttavien antureiden vaihtaminen sallitaan ai-noastaan silloin, kun tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvo ylittää asetellun raja-arvon.

Palvelualueen paine-erolle on luotu kaskadisäädin, jolle annetaan asetusarvoksi tavoiteltu paine-ero. Säätimen lähdön mukaan muutetaan tarpeen mukaisesti tulo- ja poistokanavapaine asetusarvoja, jotta tavoiteltu paine-ero saavutettaisiin. Säättötapa on suunniteltu siten, että ilmanvaihtokone voi olla myös ilmamääräsäätöinen tai vakiokierroksilla toimiva, kunhan puhaltimien pyörintänopeudet ovat portaattomasti säädettävissä. Paine-erosäädin on 4-portainen ja molempiin suuntiin on kaksi säätöportasta, kuten kuvassa 29 on esitetty. Paine-eroa säädettäessä pyritään ilmanvaihtokoneen ilmamäärä ensimmäisessä vaiheessa pitämään mitoituksen mukaisena kasvattamalla vastaavan puhaltimen kanavapaineasetusta. Mikäli tällä ei päästä tavoiteltuun asetukseen, säädin vähentää toisen puhaltimen kanavapaineasetusta.



Kuva 29. Paine-erosäätimen toiminta

Rakennusautomaatiojärjestelmän ala-asemassa on muutettavissa olevat raja-arvot, kuinka paljon säätimellä on mahdollista poikkeuttaa tulo- ja poistopuhaltimen asetusarvoa, kuten kuvasta 30 voidaan nähdä. Esimerkiksi jos tulopuhaltimen kanavapaine asetus on 100 Pa ja poikkeutuksen rajat on ylöspäin 25 % ja alaspäin -10 %, niin kanavapaine voi saada asetusarvoksi arvon väliltä 90–125 Pa. Ohjelma on toteutettu siten, että raja-arvot on mahdollista antaa myös absoluuttisina arvoina.

Säätötavan käytön valinta tehdään aikaohjelmalla, jotta erilaisia testauksia on helppo suorittaa. Säädön toiminta estetään, mikäli tuulen nopeus ylittää asetellun rajan tai paine-ero säätimen asetusarvoksi on annettu ei soveltuva arvo. Säätö saa käyntiluvan, kun aikaohjelma antaa luvan, ilmanvaihtokone käy ja mitään säädön estäviä ehtoja, kuten tuulen nopeus yli asetellun raja-arvon, ei ole voimassa. Käyntiluvan päälle menoa voidaan viivästyttää, jotta esimerkiksi ilmanvaihtokone on kerennyt käynnistymään ja tavoittanut normaalit kanava-paineasetukset ennen kuin paine-eron mukainen säätö aloitetaan.

Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron mukainen säätö: 301TK C-osa

Säätö käytössä käyttäjän valinta:  Käytössä  Ei käytössä

Säätö estetty:  Ei estoa  Pois **Mikäli asetusarvo aseteltu yli rajan 3...-3Pa tai tuulen nopeus yli rajan**

Säätö toiminnassa:  Ei estoa  Pois **IV-kone käy eikä estoja päällä**

Asetusarvo:

Mittaus:

Paine-erojen keskiarvo käytössä olevalta ulkoreferenssin suunnalta

Hälytys (Säätö ajautunut ääripäähän):

| Raja-arvot:    | Tulo_pienemmälle | Poisto_suuremmalle | Tulo_suuremmalle | Poisto_pienemmälle |
|----------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Tulopuhallin   | - 0.0 %          | + 0.0 %            | + 0.0 %          | - 0.0 %            |
| Poistopuhallin |                  |                    |                  |                    |
| Raja + 25.0 %  |                  |                    |                  |                    |
| Raja - 10.0 %  |                  |                    |                  |                    |
| Raja + 20.0 %  |                  |                    |                  |                    |
| Raja - 15.0 %  |                  |                    |                  |                    |

Tuuli ja säätöön käytettävät mittaukset:

|  |  |  |                                      |
|--|--|--|--------------------------------------|
| Tuulen nopeus 10min keskiarvo              | <input type="text" value="11.00 m/s"/> | Tuulen suunta                              | <input type="text" value="245.0 °"/> |
| mittaus < raja, säätö käytössä             | <input type="text" value="20.00 m/s"/> | Viive, jolla käytettävä mittaus vaihdetaan | <input type="text" value="10 min"/>  |
| mittaus > raja, mittauksen vaihto sallittu | <input type="text" value="5.00 m/s"/>  |  |                                      |

Säädössä käytettävän mittauksen valinta: **Automaattinen**

Käytössä olevien mittauksien ulkoreferenssien sijainti: **02 Itä**

**Paine-erot**

Kuva 30. Paine-ero säätimen asetusarvoja

#### 4.4.2 Paine-eron mittaaminen

Tavoitteiden tutkimuskysymykset liittyivät suurilta osin paine-eron mittaamiseen. Tätä varten paine-eroa mitattiin tutkimuskohteessa eri valmistajan laitteilla samasta tilasta, saman valmistajan laitteilla samasta tilassa ulkoreferenssien ollessa eri sijainneilla ja vertailu laitteilla samoista tiloista. Laitteiden tiedot ja sijoittelu on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.3.

Asennettujen laitteiden toimintaa varten kohteessa suoritettiin paine-eromitauksen tarkastelua keväällä 2020 yhteistyössä ARE Oy:n kanssa. Tarkastelun

aikana mittasimme paine-eroja hetkellisillä mittauksilla ja teimme noin viikon kestäneen seurantamittausjakson viidellä ARE Oy:n wAreless -järjestelmän paine-erolähettimillä. Kuvasta 31 on nähtävissä, kuinka vertailumittaukset asennettiin n. 1 m korkeudelle ikkunalaudalle ja ulkoreferenssi johdettiin tuuletusikkunan välistä ulos.



Kuva 31. ARE Oy:n wAreless paine-erolähetin

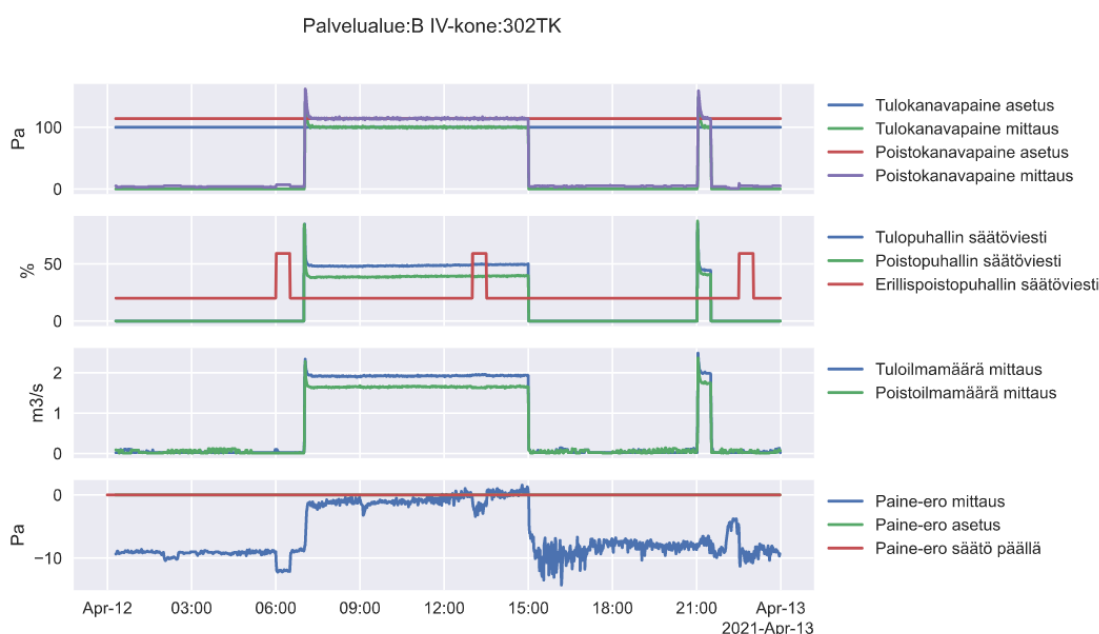
Varsinaisen tutkimuskohteen lisäksi paine-eron vertailumittauksia tehtiin kahdessa muussa toimistorakennuksessa alkuvuodesta 2021. Tällä tutkimuksella haluttiin selvittää paine-erojen asennuskorkeuden vaikutusta mittaustulokseen. Rakennusten muutostöiden yhteydessä kohteisiin oli asennettu kattava määrä paine-eromittauksia rakennuksen vaipan yli. Paine-erolähettimien asennustapa vastasi tämän tutkimuksen kohteena olleen rakennuksen asennustapaa. Paine-erolähettimet sijaitsivat rakennuksen ilmanvaihtokonehuoneissa, ja impulssiputket oli putkitettu kerroksiin. Paine-erolähettimet olivat malliltaan Pro dual PEL-N. Mittaukset suoritettiin liitteenä 1 olevan suoritusohjeen mukaisesti. Kerroksista suoraan mitatun paine-eron mittaamisen käytettiin Velocicalc 9565-P -mittalaitetta. Tutkimuskohde A oli kaksikerroksinen rakennus ja kohde B oli 7-kerroksinen rakennus.

## 5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

Mittausjärjestelmä on ollut käytössä helmikuusta 2020. Tuloksissa käytetty data on pääosin keväältä 2021. Asennuskorkeuden vaikutuksesta paine-eron mittaustulokseen käytetty data on tutkimuskohteen osalta kerätty keväällä 2020 ja muista kohteista alkuvuodesta 2021. Tuloksissa esitetty data on pääosin kerätty minuutin välein asetuksella, jossa jokainen näyte tallennetaan erikseen. Poikkeuksena ulkoilmanlämpötila, jonka näytteenottoväli on 15 minuuttia. Muut poikkeamat datan keräyksestä on esitetty tarkemmin kyseisten tuloksien esittämisen yhteydessä.

### 5.1 Ilmamäärän säätö paine-eromittauksen perusteella

Testi -ilmamäärien säätämiseen vaipan yli olevan paine-eron perusteella toteutettiin 12.4.2021–29.4.2021 välisenä aikana arkipäivisin. Rakennuksen eri osat ja ilmanvaihtokoneiden palvelualueet eivät ole selkeästi eroteltavista omiksi kokonaisuuksiksi, joten testaus suoritettiin rakennuskokonaisuutena. Rakennuksen tyhjillään olon vuoksi ilmanvaihto oli asetettu kiinteistöhuollon toimesta jaksoittaiselle käytölle. Testin aikana ilmanvaihtokoneita oli mahdollisuus ajaa testitarpeiden mukaisesti. Testausta varten ilmanvaihtokoneita ajettiin arkisin 7:00–15:00 välisenä aikana ja paine-erosäätö oli käytössä vuoropäivinä. Kuvasta 32 voidaan havaita rakennuksen B-osan ilmanvaihtokoneen käyntiaika testien aikana. Rakennuksen muut ilmanvaihtokoneet kävivät saman käyntiprofiilin mukaisesti.

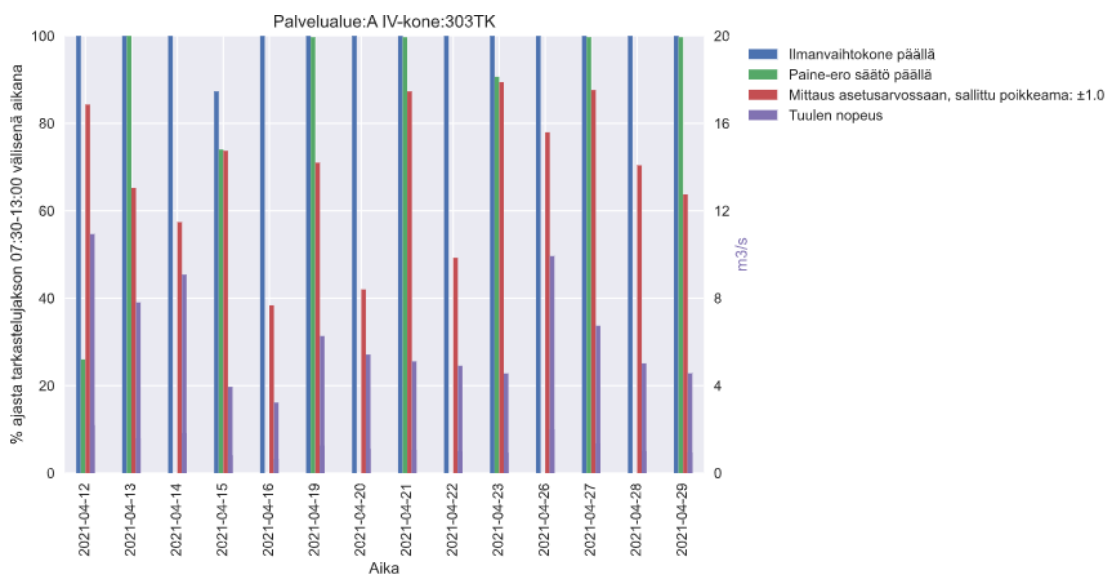


Kuva 32. B-osan ilmanvaihtokoneen vuorokautinen käyntiprofiili

Paine-erosäädön toimivuuden vertailu on tehty laskemalla paine-eron pysyvyys asetusarvossaan ilmanvaihtokoneen käyntiajalle. Laskennassa jokaisella näytteenottohetkellä (1min) on tarkasteltu, onko paine-ero asetusarvossaan. Paine-eron ollessa asetusarvossaan saa ”mittaus asetusarvossaan” -muuttuja arvokseen 1, muussa tapauksessa arvon 0. Lopuksi lasketaan keskiarvo jokaisen näytteenottohetken ”mittaus asetusarvossaan” -muuttujasta ja tulos kerrotaan 100.0, jotta tulokseksi saadaan prosenttilukema pysyvyydestä. Paine-erosäädön asetusarvo on ollut 0 Pa. Sallittu poikkeama mittauksen ja asetusarvon välillä  $\pm 1$ Pa. Paine-erosäädön toimivuuden tarkasteluajaksi on valittu päivittäin 7:30-13:00. Paine-erosäädön käynnistymisessä on 30 minuutin viive siitä, kun ilmanvaihtokone on käynnistynyt, tämän ajan, jolloin säätö ei ole käytössä, ei ole mielekästä vertailuun. Lisäksi palvelualueiden erillispoistopuhaltimien tehostuminen klo13.00–13.30 välillä aiheuttaa nopean muutoksen paine-eroon, johon paine-eron säätö ei kerkeä reagoimaan, ja siten se on järkevä jättää tarkastelun ulkopuolelle.

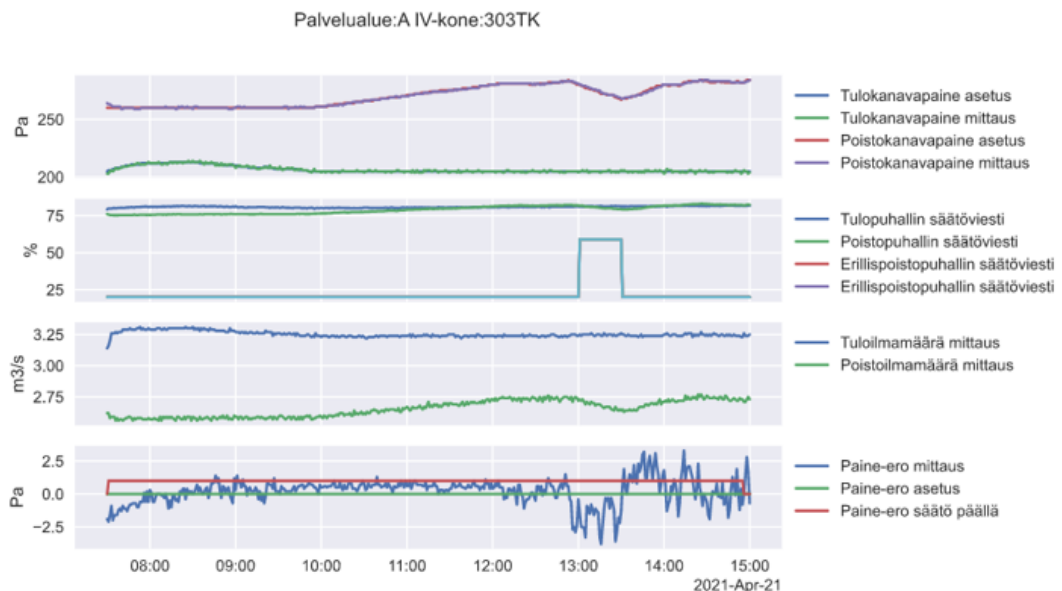
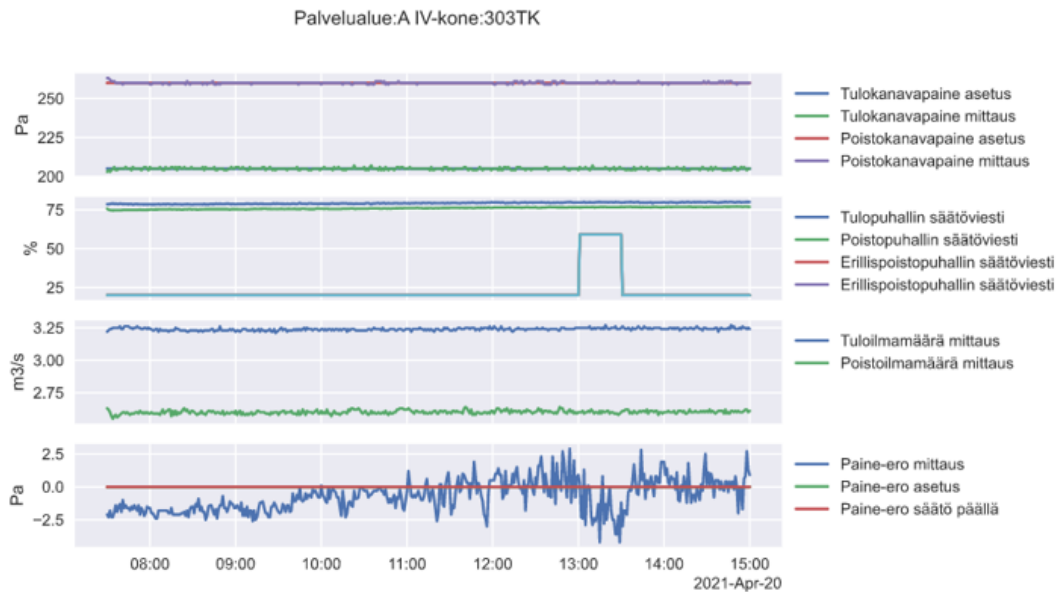
### 5.1.1 Säädön käyttäytyminen rakennuksen A-osalla

Kuvasta 33 voidaan havaita, että paine-ero säädön ollessa päällä paine-eron mittaus on asetusarvossaan suuremman osan tarkastelujakson ajasta verrattaessa päiviin, jolloin säätö ei ole käytössä.



Kuva 33. Paine-erosäädön toiminta rakennuksen A-osalla

Kuvasta 34 voidaan havaita, että paine-ero pysyy lähellä asetusarvoaan paine-erosäädön ollessa käytössä. Erillispoistopuhaltimien klo.13:00–13:30 tehostuminen aiheuttaa palvelualueelle pienen alipaineineen, jota säätö ei kerkeä korjaamaan. Aamulla paine-eroa korjataan lisäämällä tuloilman määrää ja päivän aikana tilanne kääntyy siihen, että korjausta tehdään lisäämällä poistoilman määrää. Tilanne johtuu siitä, että päivän aikana ulkoilmanlämpötila nousee ja hormivaikutus on näin ollen pienempi iltapäivällä.

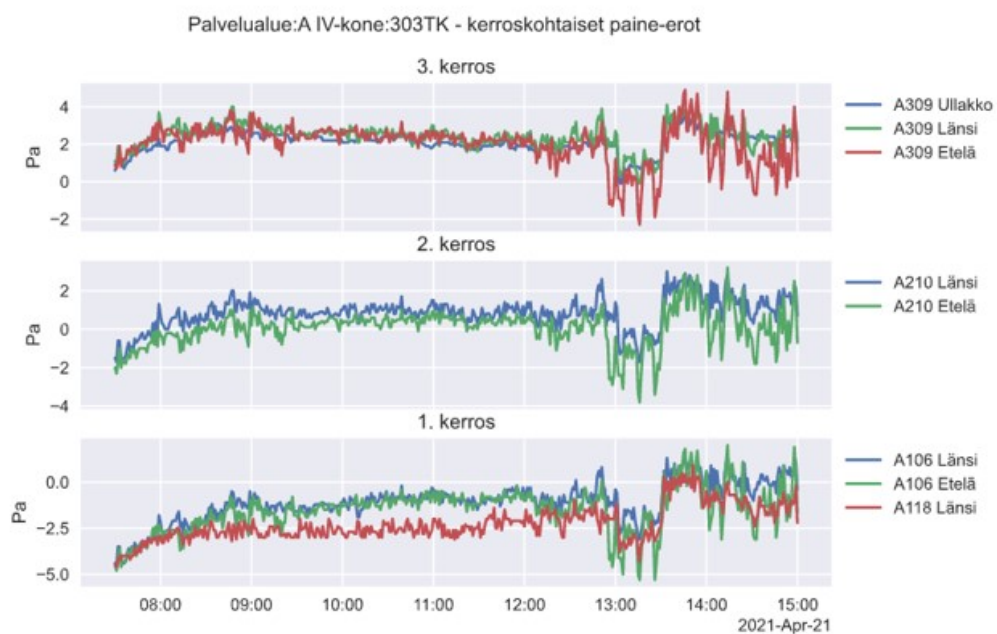
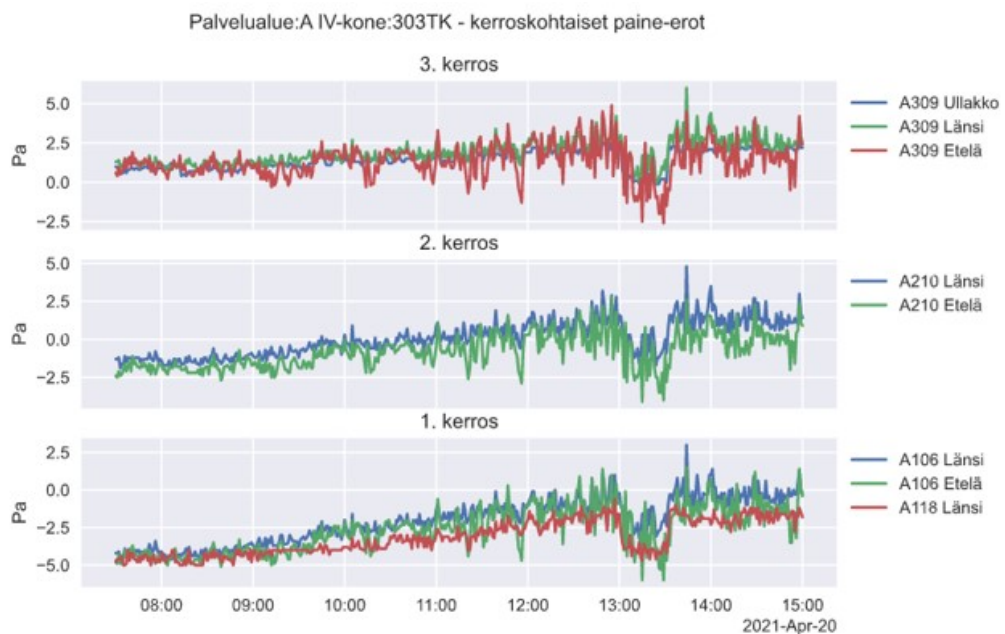


Kuva 34. Ilmanvaihtokoneen ja paine-eron käyttäytyminen rakennuksen A-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-erosäätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

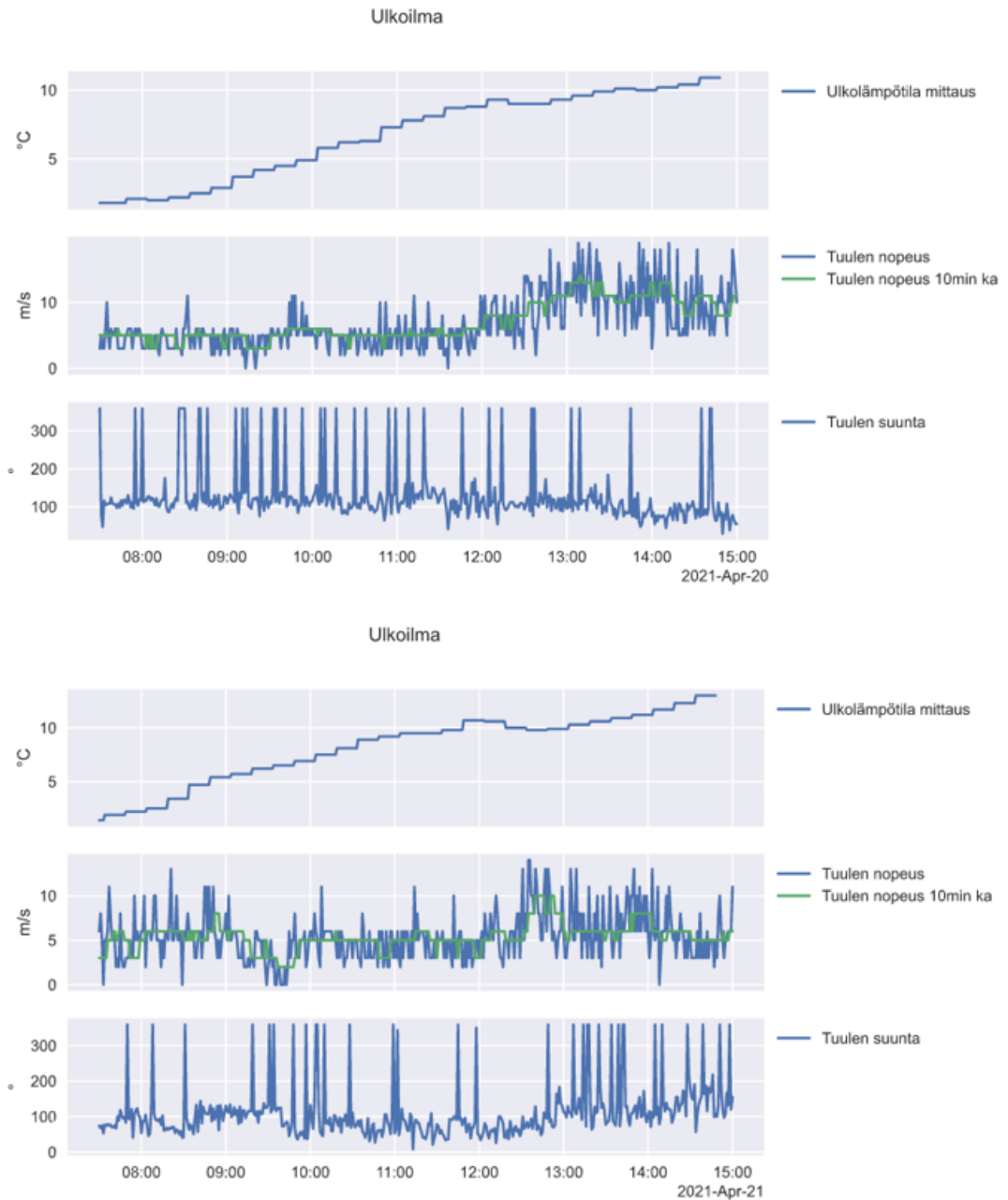
A-osan kerroskohtaiset paine-erot käyttäytyvät yhtäläisesti kerrosten välillä. Ensimmäisen kerroksen osalta palvelualue on hieman alipaineinen, toinen kerros hyvin lähellä neutraalia ja kolmas kerros hieman ylipaineinen, kuten kuvasta 35 voidaan nähdä. Paine-eron käyttäytymisestä päivänä, jolloin paine-

ero säätö ei ole käytössä, voidaan selkeästi havaita savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron muutos vertailtaessa sitä ulkoilmanlämpötilaan, joka on esitetty kuvassa 36. Tuulen nopeuden nousu aiheuttaa havaittavaa hajontaa paine-eromittauksiin. Tilan A309 paine-ero mittaus, jonka ulkoreferenssi sijaitsee ullakolla, reagoi tuuleen huomattavasti vähemmän kuin mittaukset, joiden ulkoreferenssi on ulkona.

Tilassa A118 sijaitsevan vertailumittauksen perusteella voidaan havaita, että ilmanvaihtokonehuoneessa sijaitsevat ja korjauslaskennalla korjatut mittaukset vastaavat hyvin toisiaan, kuten kuvasta 35 voidaan havaita.



Kuva 35. Kerroskohtaisien paine-erojen käyttäytyminen rakennuksen A-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

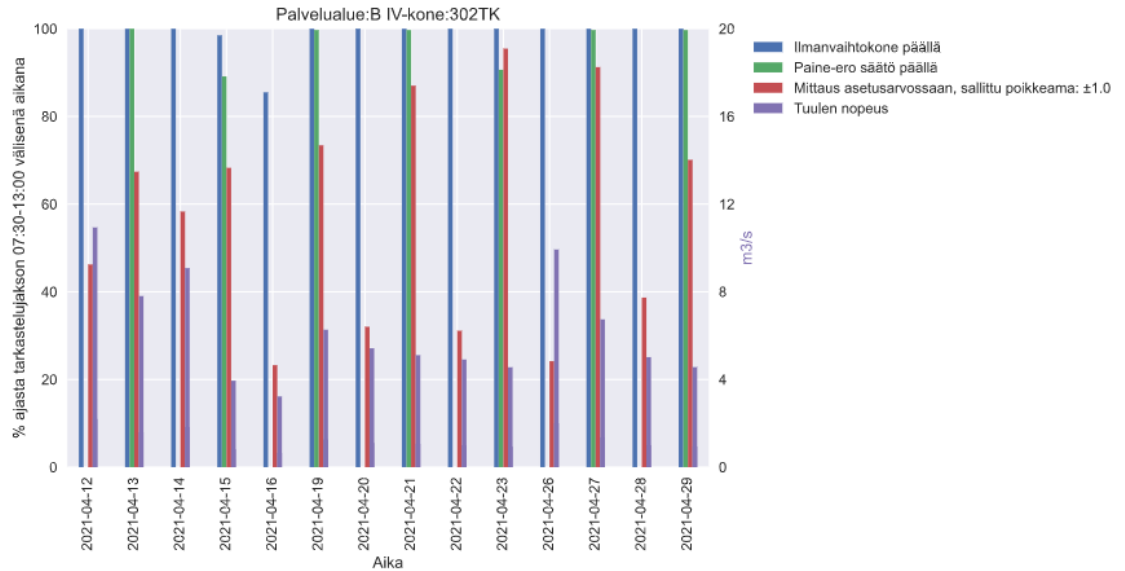


Kuva 36. Tuulennopeus ja ulkolämpötila. Ylhäällä ulkoilmaolosuhteet päivältä, jolloin paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jolloin säätö on käytössä.

### 5.1.2 Säädön käyttäytyminen rakennuksen B-osalla

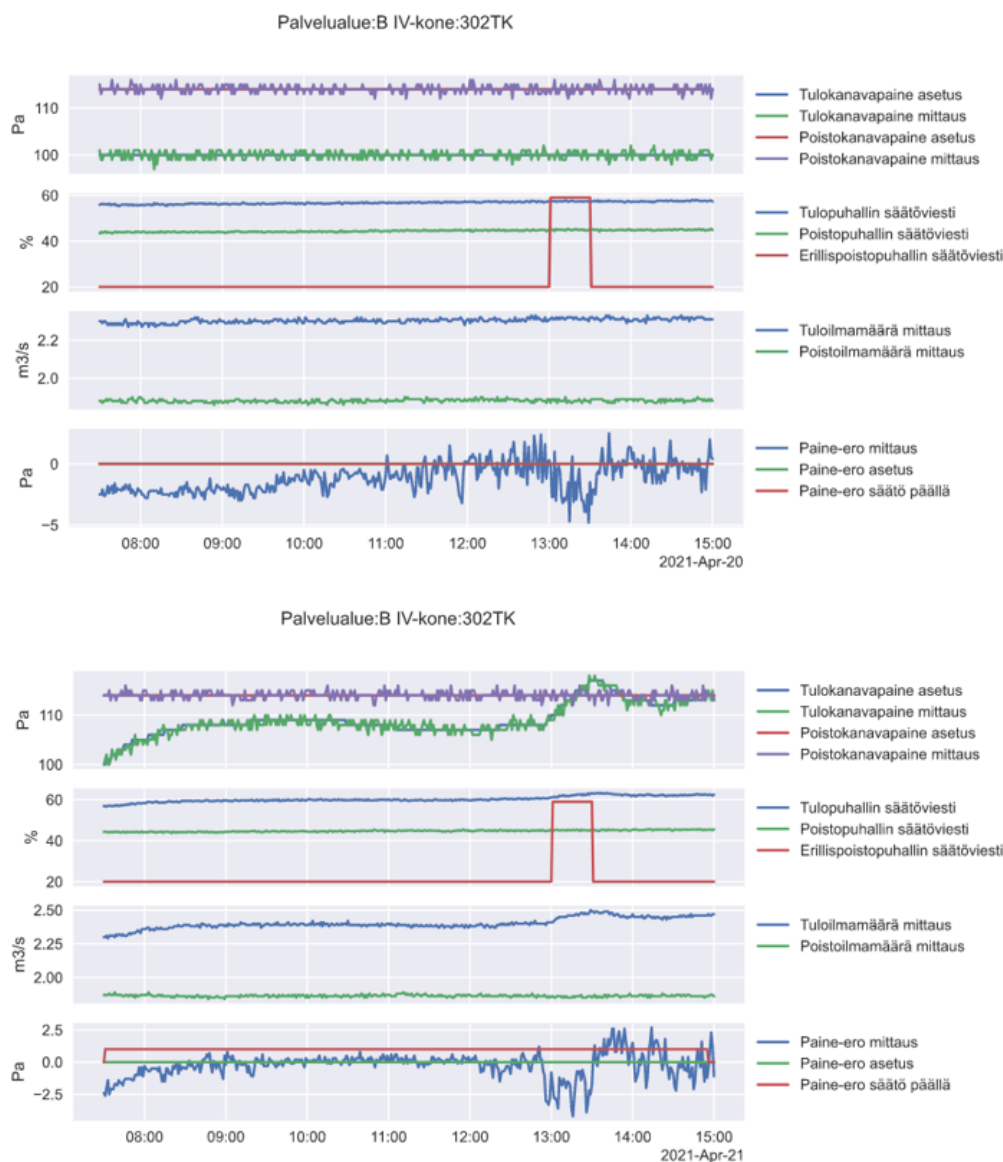
Kuvasta 37 voidaan havaita, että paine-erosäädön ollessa päällä paine-eron mittaus on asetusravossa suuremman osan tarkastelujakson ajasta verrattessa päiviin, jolloin säätö ei ole käytössä.





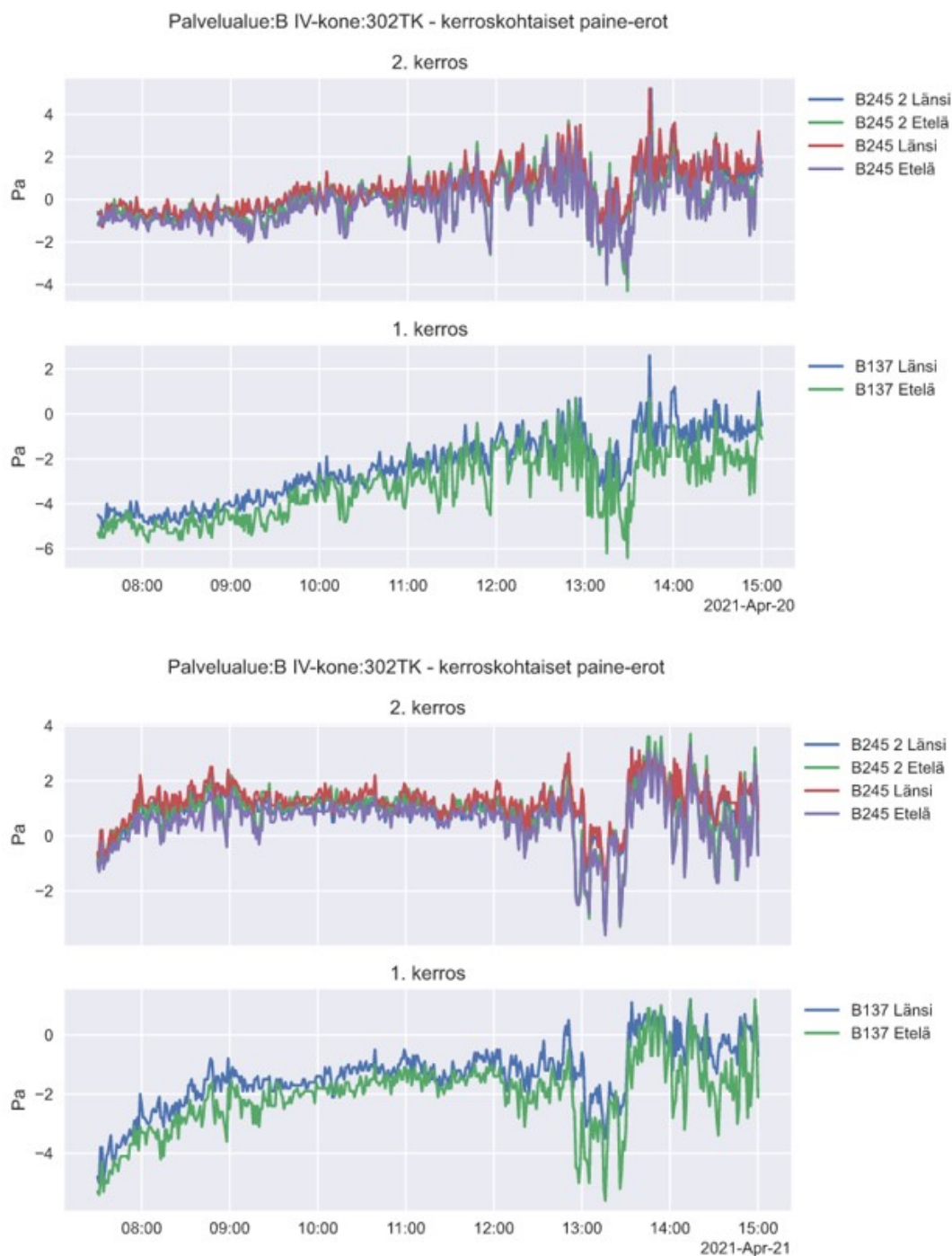
Kuva 37 Paine-erosäädön toiminta rakennuksen B-osalla

Kuvasta 38 voidaan havaita, että paine-ero pysyy lähellä asetusarvoaan paine-erosäädön ollessa käytössä. Erillispoistopuhaltimen tehostuminen klo 13:00–13:30 aiheuttaa palvelualueelle pienen alipaineineen, jota säätö ei kerkeä korjaamaan. Ilmamäärä korjataan päivän aikana lisäämällä tuloilman määrää.



Kuva 38. Ilmanvaihtokoneen ja paine-eron käyttäytyminen rakennuksen B-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

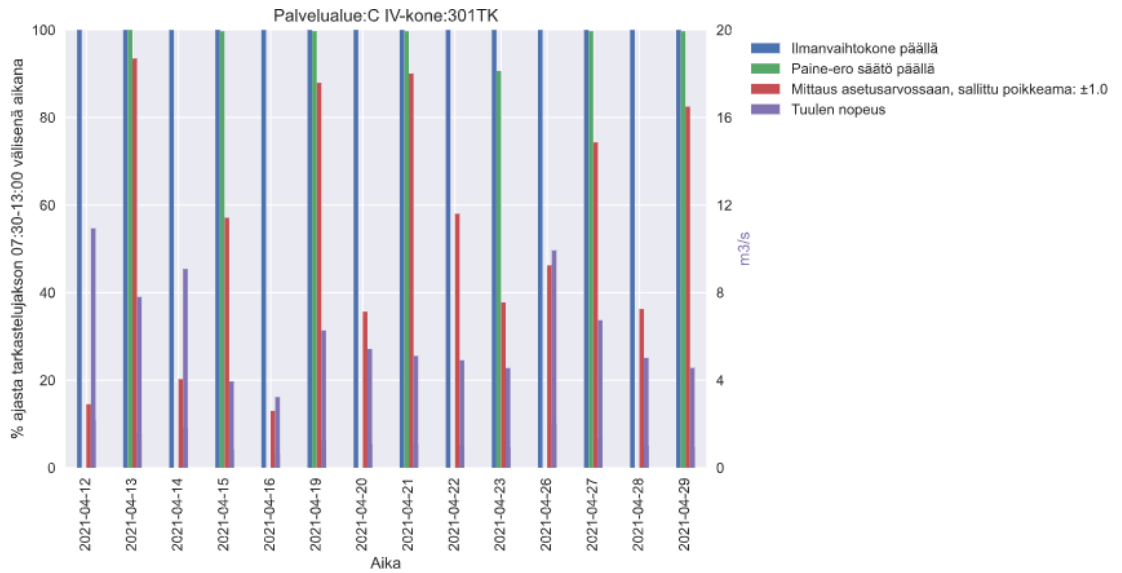
B-osan kerroskohtaiset paine-erot käyttäytyvät yhtäläisesti kerrosten välillä. Ensimmäisen kerroksen osalta palvelualue on hieman alipaineinen ja toinen kerros on hyvin lähellä neutraalia, kuten kuvasta 39 voidaan nähdä. Paine-eron käyttäytymisestä päivänä, jolloin paine-ero säätö ei ole käytössä voidaan selkeästi havaita savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron muutos vertaillaessa sitä ulkoilmanlämpötilaan, joka on esitetty aikaisemmin kuvassa 36. Tuulen nopeuden nousu aiheuttaa havaittavaa hajontaa paine-eromittauksiin.



Kuva 39. Kerroskohtaisten paine-erojen käyttäytyminen rakennuksen B-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

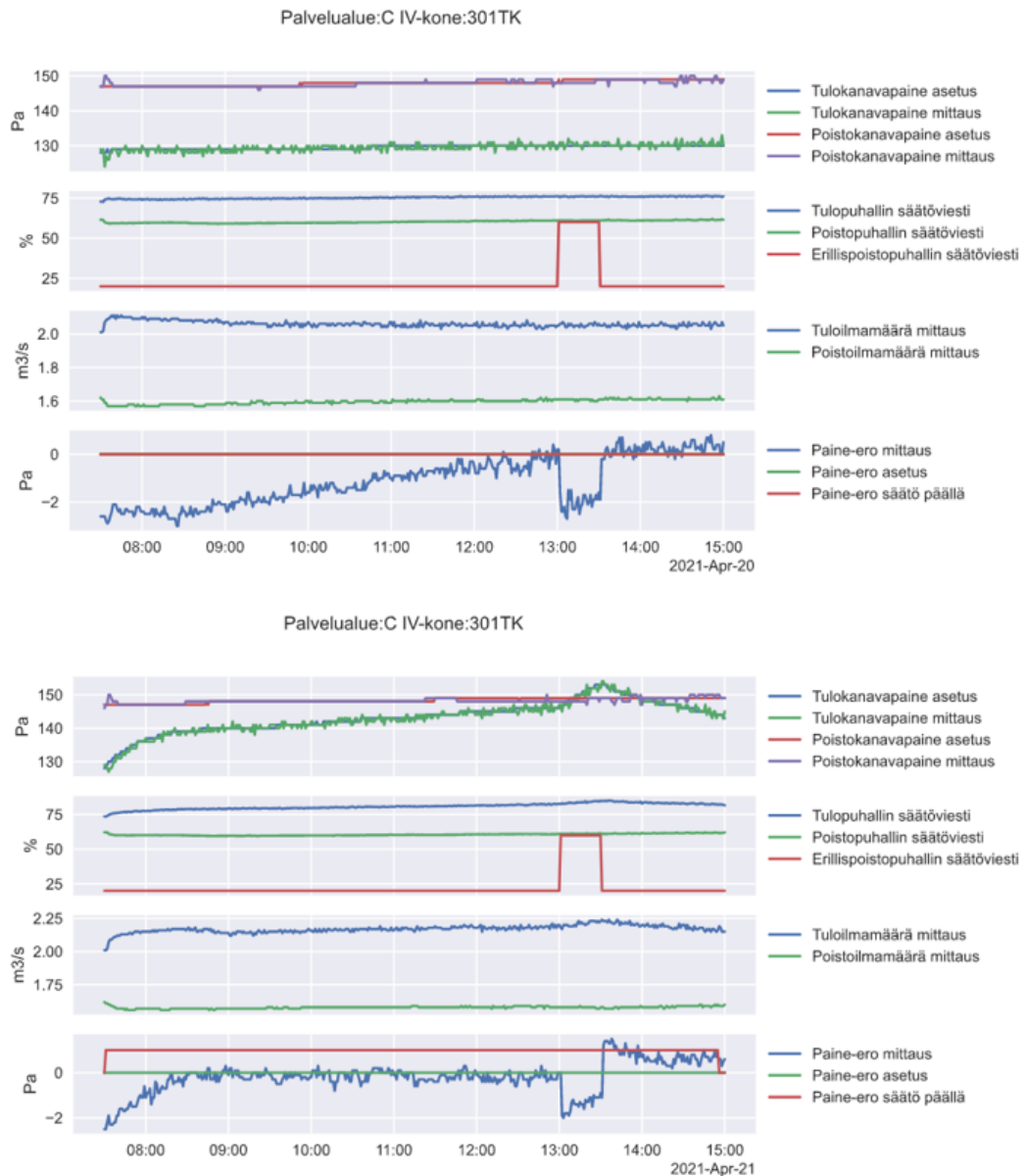
### 5.1.3 Säädön käyttäytyminen rakennuksen C-osalla

Kuvasta 40 voidaan havaita, että paine-erosäädön ollessa päällä paine-eron mittausta on asetusravossa suuremman osan tarkastelujakson ajasta verrattavissa päiviin, jolloin säätö ei ole käytössä.



Kuva 40. Paine-erosäädön toiminta rakennuksen C-osalla

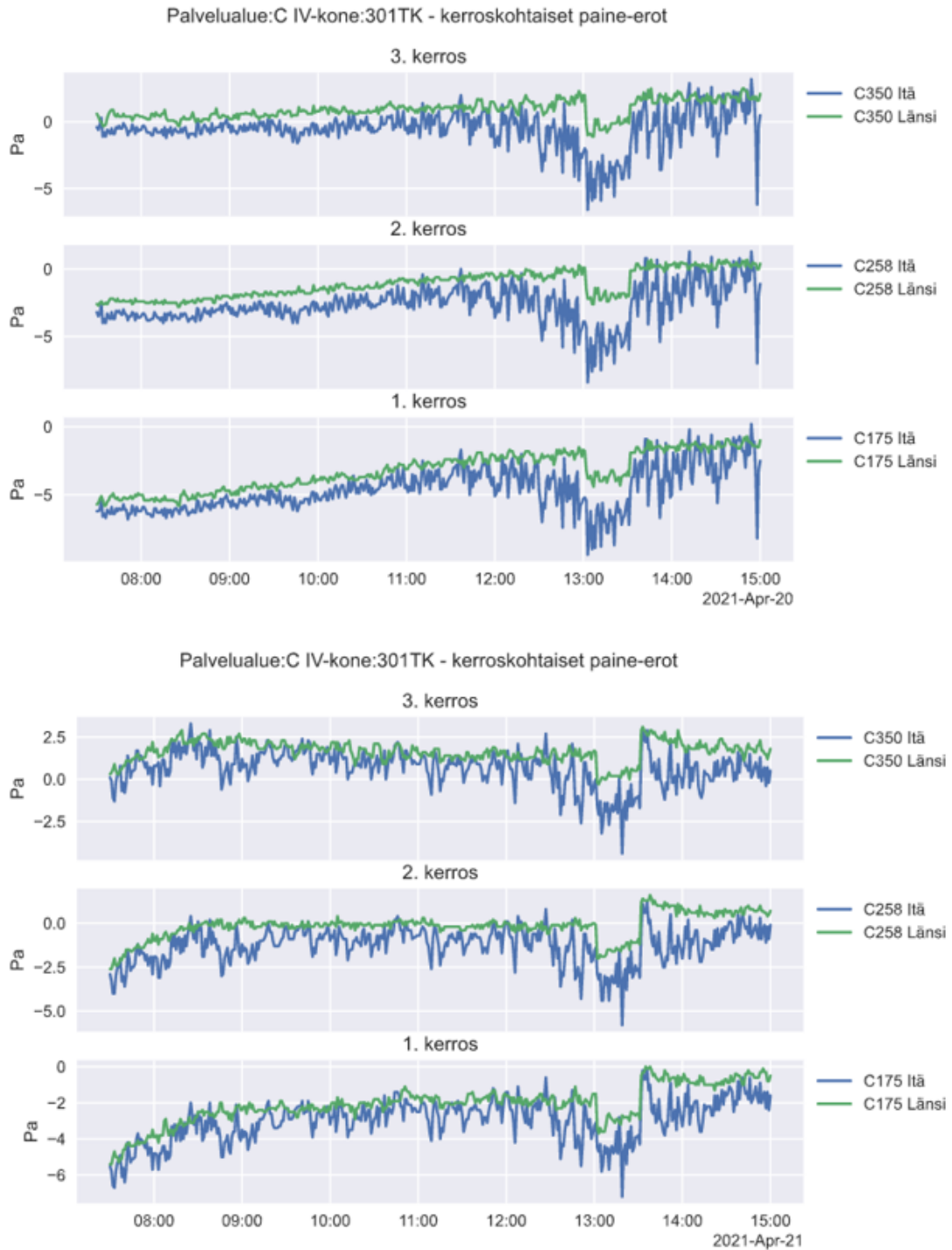
Kuvasta 41 voidaan havaita, että paine-ero pysyy lähellä asetusarvoaan paine-erosäädön ollessa käytössä. Erillispoistopuhaltimen tehostuminen klo 13:00–13:30 aiheuttaa palvelualueelle pienen alipaineineen, jota säätö ei kerkeä korjaamaan. Ilmamäärä korjataan päivän aikana lisäämällä tuloilman määrää.



Kuva 41. Ilmanvaihtokoneen ja paine-eron käyttäytyminen rakennuksen C-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

C-osan kerroskohtaiset paine-erot käyttäytyvät yhtäläisesti kerrosten välillä. Ensimmäisen ja toisen kerroksen osalta palvelualue on hieman alipaineinen ja kolmannen kerroksen osalta lähellä neutraalia, kuten kuvasta 42 voidaan nähdä. Paine-eron käyttäytymisestä päivänä, jolloin paine-erosäätö ei ole käytössä, voidaan selkeästi havaita savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron muutos vertailtaessa sitä ulkoilmanlämpötilaan, joka on esitetty aikaisemmin kuvassa 36. Tuulen nopeuden nousu aiheuttaa havaittavaa hajontaa paine-eromittauksiin. C-osan länsipuolella oleva paine-erojen ulkoreferenssi sijaitsee rakennuksen sisäpihan puolella, ja verrattaessa sitä A- ja B-osan länsipuolen paine-eromittauksiin mittauksen heilunta on huomattavasti pienempää. Huhtikuun 20. päivänä tuulen suunta on ollut suurimmaksi osaksi n.100°,

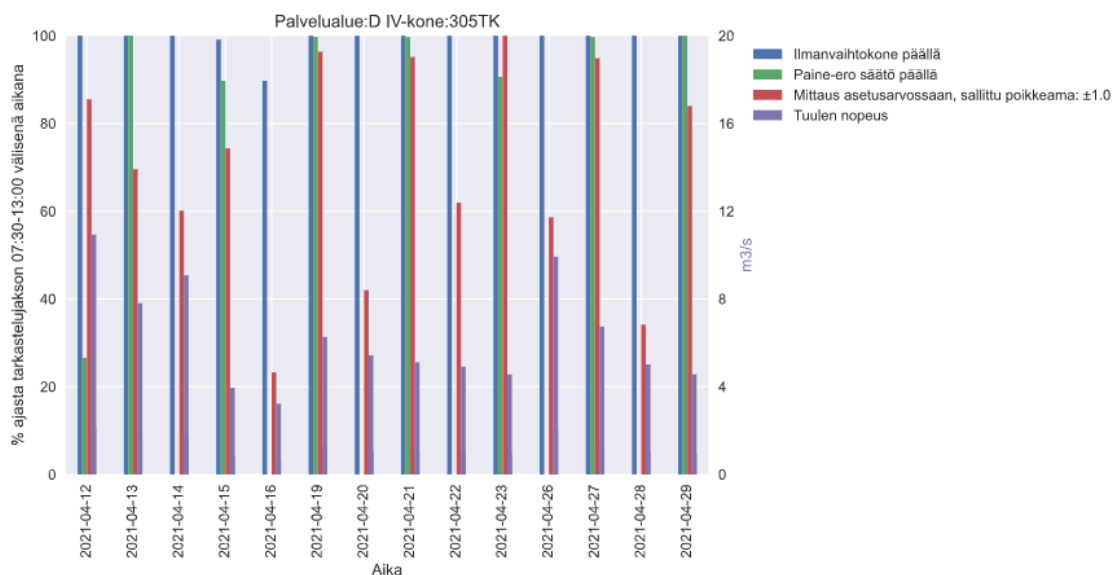
mikä vastaa tuulensuuntaa idän suunnasta. Paine-eromittauksista, joiden ulkoreferenssi sijaitsee idän puolella, on havaittavissa tuulennopeudesta aiheutuvaa muutosta.



Kuva 42. Kerroskohtaisien paine-erojen käyttäytyminen rakennuksen C-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

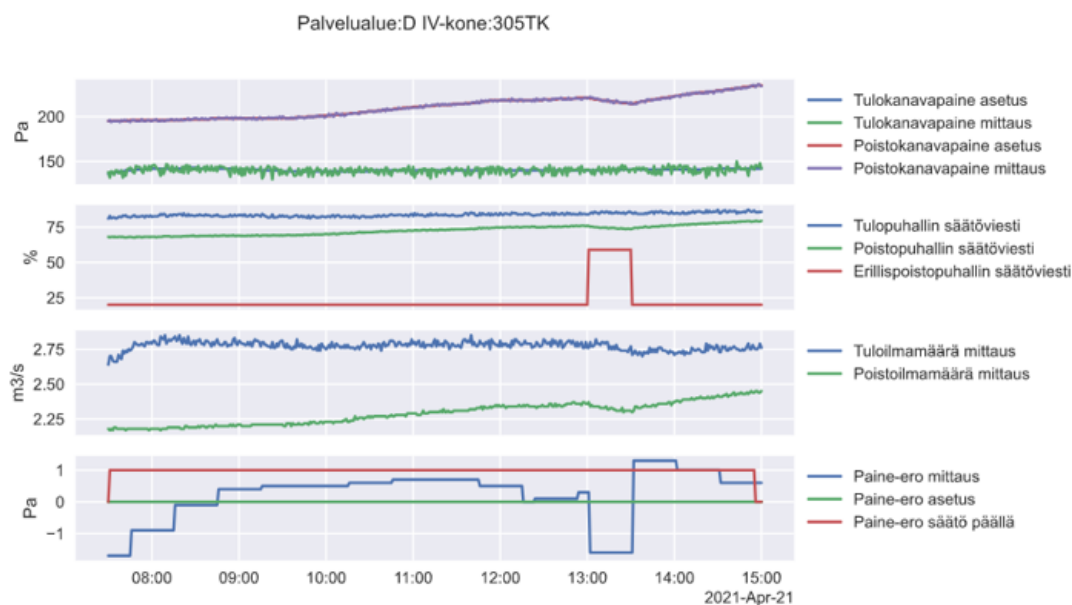
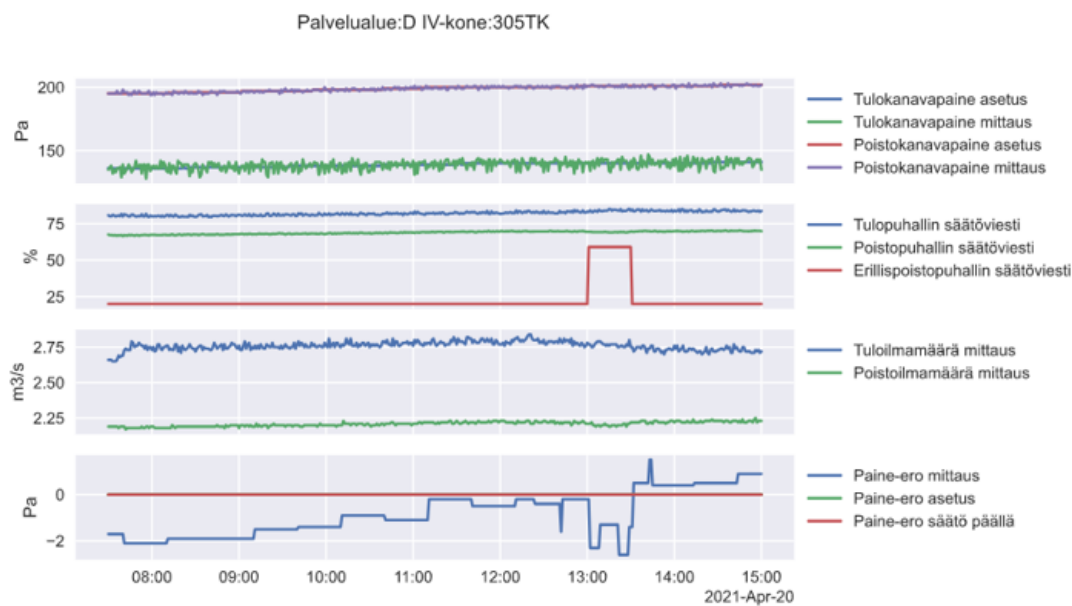
### 5.1.4 Säädön käyttäytyminen rakennuksen D-osalla

Kuvasta 43 voidaan havaita, että paine-erosäädön ollessa päällä paine-eron mittausta on asetusravossa suuremman osan tarkastelujakson ajasta verrattuna päiviin, jolloin säätö ei ole käytössä.



Kuva 43. Paine-erosäädön toiminta rakennuksen D-osalla

Kuvasta 44 voidaan havaita, että paine-ero pysyy lähellä asetusravoaan paine-erosäädön ollessa käytössä. Erillispoistopuhaltimen tehostuminen klo 13:00–13:30 aiheuttaa palvelualueelle pienen alipaineineen, jota säätö ei kerkeä korjaamaan. Ilmamäärä korjataan päivän aikana lisäämällä poistoilman määrää. Säädössä käytettävä mittaus näyttää käyttäytyvän kuvassa huomattavasti rauhallisemmin kuin rakennuksen muilla osilla. Tämä johtuu siitä, että ala-aseman kyseisen mittauspisteen toleranssi, jonka mukaisesti arvo lähetetään valvomolle, on ollut arvossa 1, kun muiden osien osalta arvo on ollut 0,1. Kyseinen asetusta ei vaikuta kuin valvomolle lähetettävään arvoon, eikä sillä ole merkitystä säädön toimivuuteen.

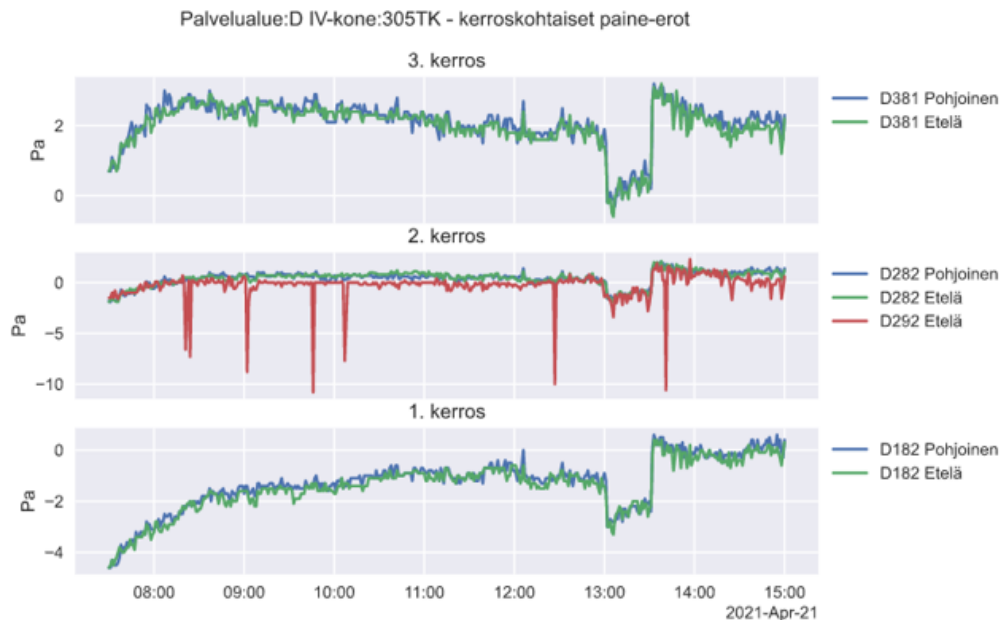
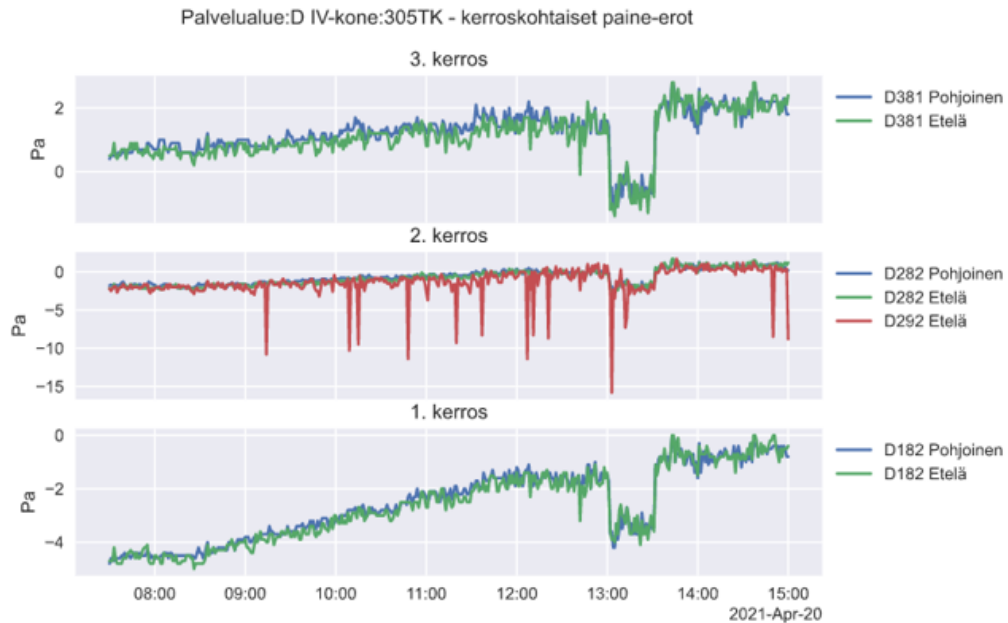


Kuva 44. Ilmanvaihtokoneen ja paine-eron käyttäytyminen rakennuksen D-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-erosäätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

D-osan kerroskohtaiset paine-erot käyttäytyvät yhtäläisesti kerrosten välillä. Ensimmäisen ja toisen kerroksen osalta palvelualue on hieman alipaineinen ja kolmannen kerroksen osalta lähellä neutraalia, kuten kuvasta 45 voidaan nähdä. Paine-eron käyttäytymisestä päivänä, jolloin paine-erosäätö ei ole käytössä, voidaan selkeästi havaita savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron muutos vertailtaessa sitä ulkoilmanlämpötilaan, joka on esitetty aikaisemmin kuvassa 36. Tuulen nopeuden nousu aiheuttaa havaittavaa hajontaa paine-eromittauksiin.



Tilassa D292 sijaitsevan vertailumittauksen perusteella voidaan havaita, että ilmanvaihtokonehuoneessa sijaitsevat ja korjauslaskennalla korjatut mittaukset vastaavat hyvin toisiaan, kuten kuvasta 45 voidaan havaita. Kuvasta voidaan myös havaita langattomassa vertailumittauksessa olevista kommunikointivirheistä, jotka näkyvät piikkeinä alaspäin.



Kuva 45. Kerroskohtaisten paine-erojen käyttäytyminen rakennuksen D-osalla. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

### 5.1.5 Paine-erosäädön toimivuus koko rakennuksen osalta

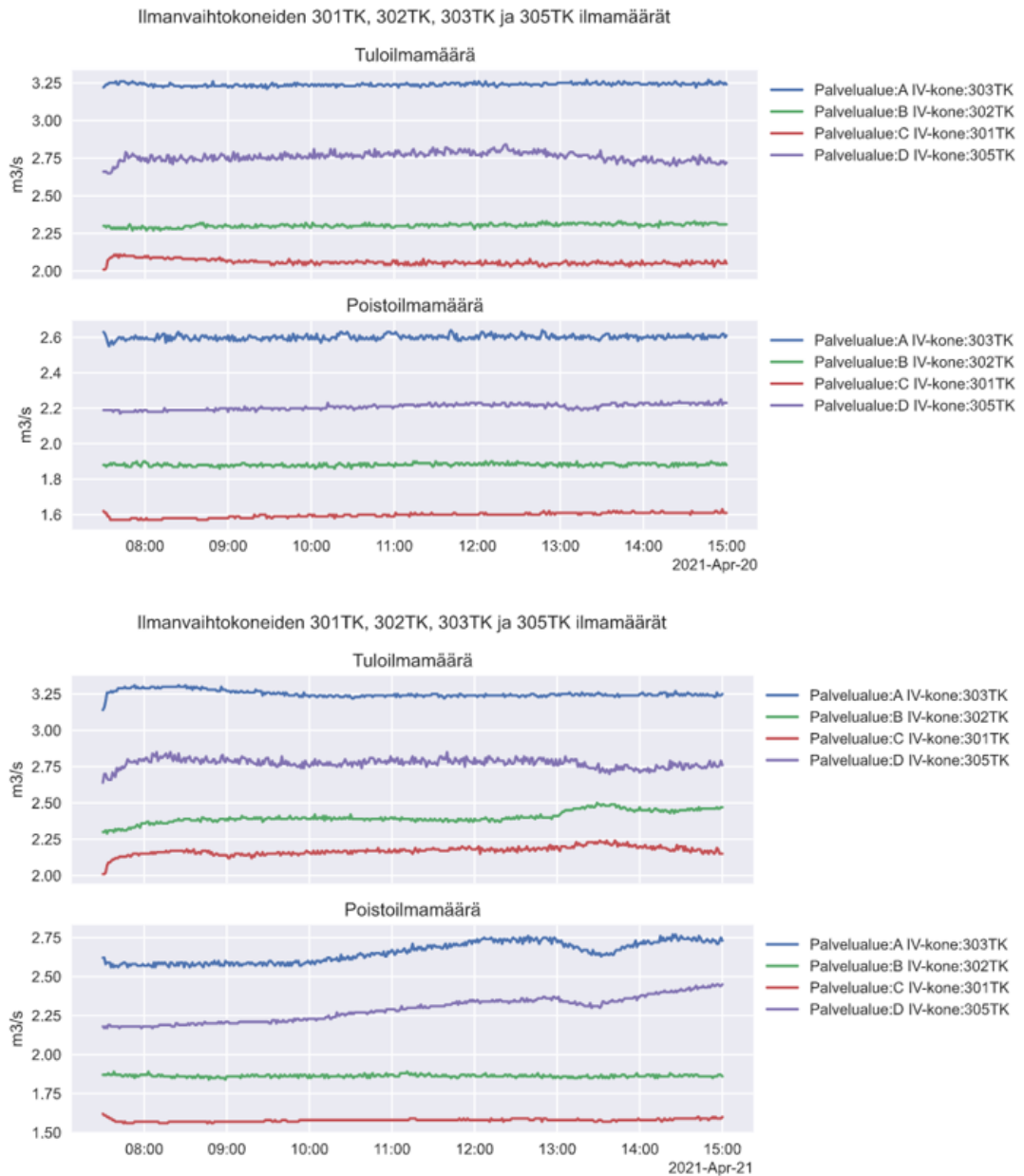
Tarkasteltaessa yksittäisen rakennuksen osan osalta paine-erosäädön toimintaa voidaan todeta, että säädön ollessa päällä rakennuksen osan paine-ero

vaipan yli pysyy tavoitellussaan asetusarvossa suuremman osan ajasta kuin ilman aktiivista säätöä. Taulukosta 3 nähdään kaikkien rakennuksen osien ilmanvaihtokoneiden pysyvyydet, joista voidaan havaita, että paine-eron mitaus on pysynyt huomattavasti paremmin asetusarvossan silloin kun säätö on ollut käytössä.

Taulukko 3. Ilmanvaihtokoneiden 301TK, 302TK, 303TK ja 305TK yhteenlasketut pysyvyydet

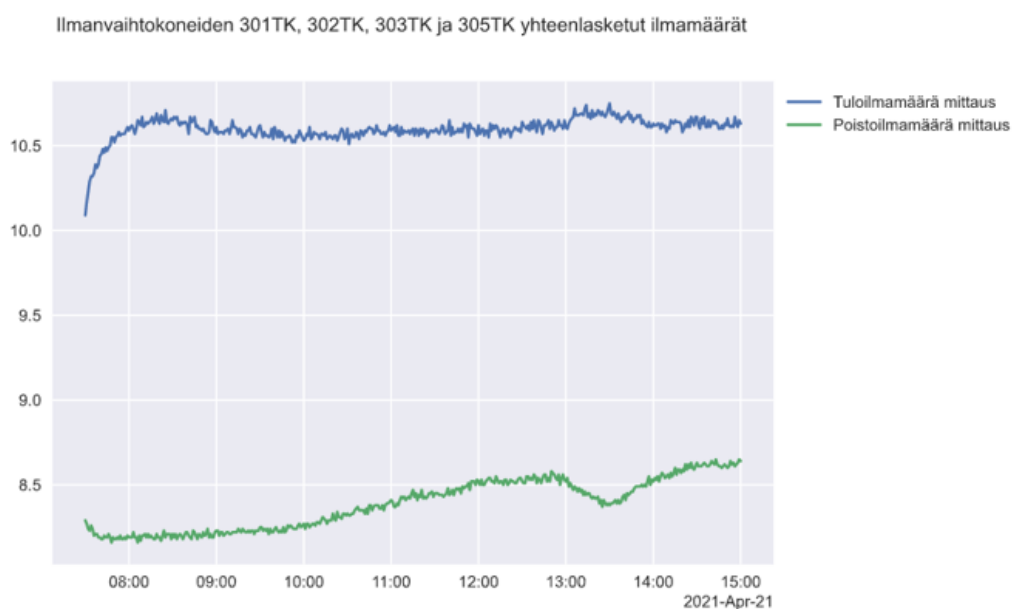
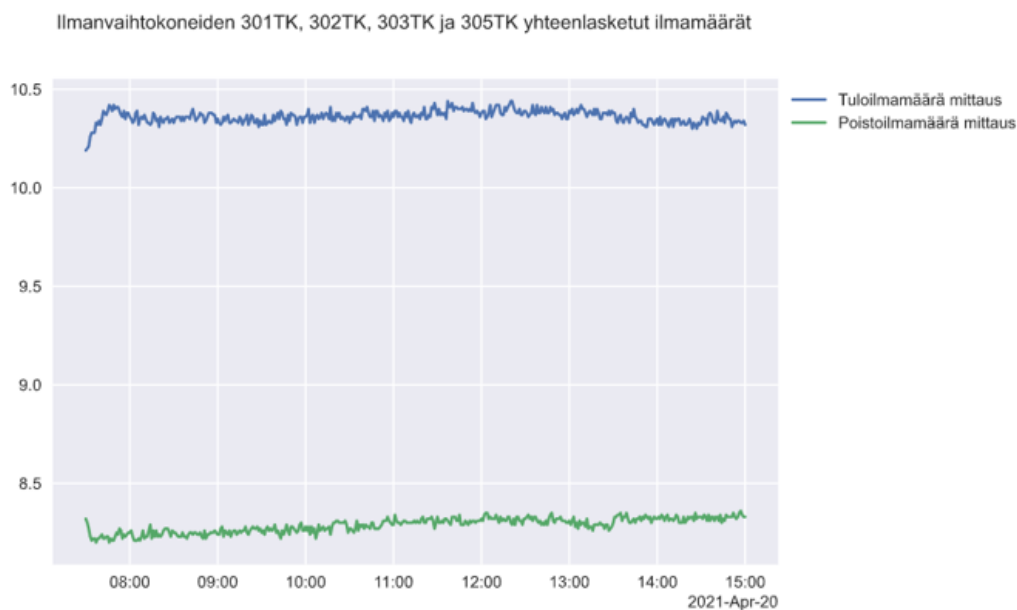
|  | Säätö käytössä | Säätö ei käytössä |
|--|----------------|-------------------|
| Päiviä   | 7              | 7                 |
| Ilmanvaihtokoneet päällä                               | 99,5 %         | 99,1 %            |
| Paine-ero säätö päällä                                 | 96,8 %         | 1,9 %             |
| Mittaus asetusarvossaan, sallittu poikkeama: $\pm 1,0$ | 79,6 %         | 45,1 %            |

Kuitenkin tarkasteltaessa ilmanvaihtokoneiden ilmamääriä havaitaan, että ilmanvaihtokoneet 301TK ja 302TK ovat korjanneet palvelualueen paine-eroa lisäämällä tuloilmamäärää. Samanaikaisesti ilmanvaihtokoneet 303TK ja 305TK ovat korjanneet paine-eroa lisäämällä poistoilmamäärää, kuten kuvasta 46 voidaan nähdä.



Kuva 46. Rakennuksen ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

Kuvasta 47 voidaan havaita, että paine-erosäädön ollessa käytössä sekä tulo- että poistoilmamäärät ovat kasvaneet verrattaessa päivään, jolloin säätö ei ole käytössä. Tämä johtuu siitä, että palvelualueet eivät ole toisiinsa nähden tiiviitä ja osa ilmanvaihtokoneista säätää paine-eroa tuloilmamäärää lisäämällä ja osa poistoilmamäärää lisäämällä.



Kuva 47. Rakennuksen ilmanvaihtokoneiden yhteenlasketut ilmamäärät. Ylhäällä päivä, jossa paine-ero säätö ei ole käytössä, ja alhaalla päivä, jossa säätö on käytössä.

Paine-erosäädön osalta tulokset ovat linjassa Timo Keskikurun (2018) väitöskirjan kanssa. Toteutettu paine-erosäätö toimi teknisesti moitteettomasti tutkimuskohteissa. (Keskikuru 2018.) Säättävällä pystytään vaikuttamaan rakennuksen vaipan yli oleviin paine-eroihin rakennuksen ollessa tarpeeksi tiivis.

## 5.2 Kahden eri valmistajan paine-eroläheittäimien vertailu

Paine-eroläheittäimien vertailu on tehty 16.4–4.5.2021 välisenä aikana kerätyn datan perusteella. Paine-eroläheittäimet on kytketty rinnankytkennällä paine-

eroimpulssiputkiin. Kaksi lähetintä mittaa paine-eroa samasta tilasta ja samasta ulkoreferenssistä. Lähetinpareja on sekä etelän että lännen puolelle sijaitsevin ulkoreferenssein. Kuvasta 48 voidaan nähdä, että molempien valmistajien paine-erolähettimien mittaukset ovat hyvin lähellä toisiaan.



Kuva 48. Paine-erojen käyttäytyminen tilassa B245

Kuvasta 48 nähtävä pieni ero länsipuolen mittauksista voidaan tarkemmin havaita taulukon 4 keskiarvojen eroavaisuudesta. Vaisalan ja Produalin keskiarvojen erotus on 0,4 Pa. Molempien valmistajien ilmoittama lähettimen tarkkuus on noin 0,5 Pa, jonka sisään erotus mahtuu.

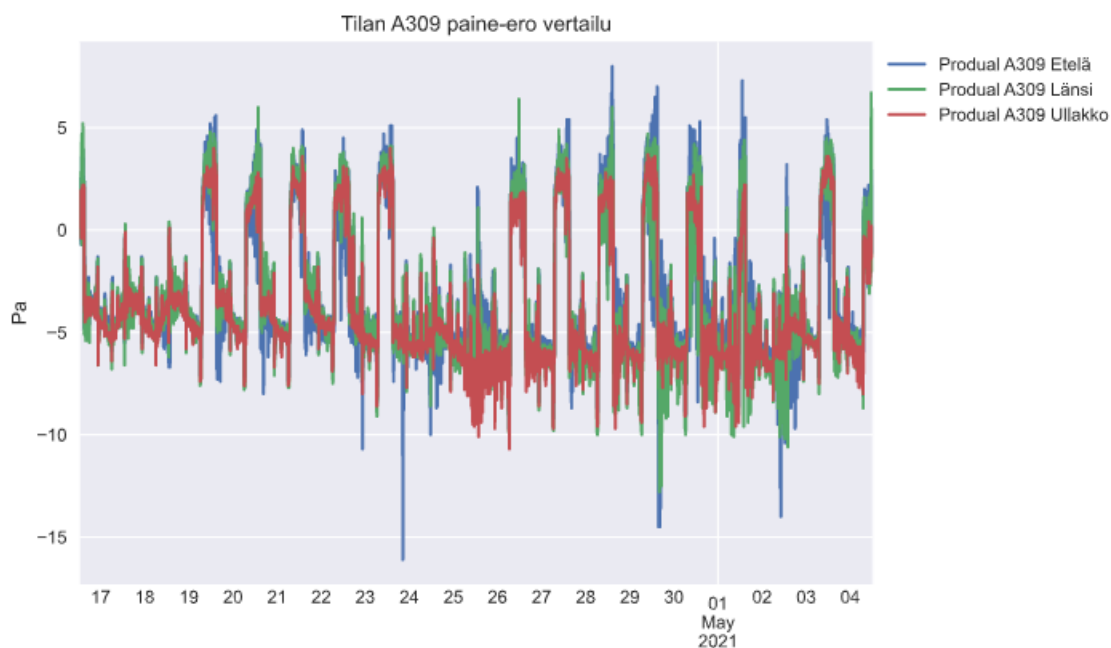
Taulukko 4. Tilan B245 Paine-ero lähettimien vertailu

|                     | Vaisala B245<br>Länsi | Produal B245<br>Länsi | Vaisala B245<br>Etelä | Produal B245<br>Etelä |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Näytteitä</b>    | 26480                 | 26480                 | 26480                 | 26480                 |
| <b>Keskiarvo</b>    | -5,3                  | -4,9                  | -4,9                  | -5,0                  |
| <b>Keskihajonta</b> | 3,3                   | 3,2                   | 3,2                   | 3,1                   |
| <b>Pienin</b>       | -15,6                 | -13,2                 | -18,2                 | -17,2                 |
| <b>Alaneljännes</b> | -7,7                  | -7,2                  | -7,2                  | -7,2                  |
| <b>Mediaani</b>     | -6,5                  | -6,1                  | -6,2                  | -6,1                  |
| <b>Yläneljännes</b> | -3,8                  | -3,5                  | -3,7                  | -3,6                  |
| <b>Suurin</b>       | 5,2                   | 5,2                   | 6,3                   | 6,3                   |

### 5.3 Paine-erolähettimen ulkoreferenssin sijainnin vertailu

Paine-erolähettimeiden vertailu on tehty 16.4–4.5.2021 välisenä aikana kerätyn datan perusteella. Vertailun paine-erolähettimeillä on ulkoreferenssit eri sijainneilla. Kahden lähettimeen ulkoreferenssit sijaitsevat rakennuksen ulkoseinällä ja yhden sijaitsee tuulettuvassa ullakkotilassa. Huonetilan impulssiputkitus on toteutettu siten, että etelän suuntaisella lähettimeellä on oma putkensa ja länsi- ja ullakkosuuntaiset lähettimet jakavat putkituksen.

Kuvasta 49 voidaan nähdä, että tilan A309 paine-eromittaukset käyttäytyvät keskimääräisesti toistensa kaltaisesti. Tuulettuvassa ullakkotilassa sijaitseva ulkoreferenssi suodattaa suurimmat tuulesta aiheutuvat paine-erojen piikit pois. Tämä voidaan havaita kuvan lisäksi myös taulukon 5 lukuja vertaamalla. Ullakkotilassa sijaitsevan ulkoreferenssin omaavan paine-ero lähettimeen mitaustuloksien pienin ja suurin arvo eroaa huomattavasti verrokeistaan, kun taas alaneljännes, mediaani ja yläneljännes ovat verrokkeihin nähden vastaavat.



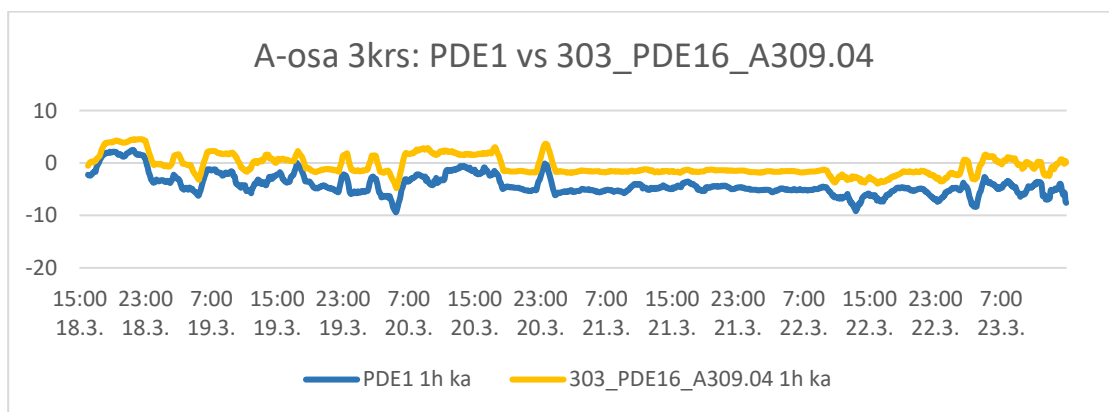
Kuva 49. Paine-erojen käyttäytyminen tilassa A309

Taulukko 5. Tilan A309 paine-erolähettimien vertailu

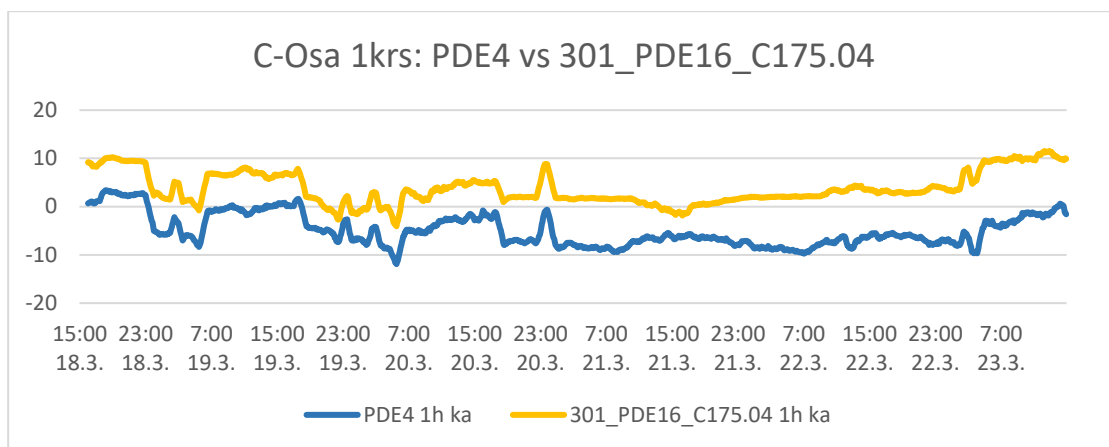
|              | Produal A309 Etelä | Produal A309 Länsi | Produal A309 Ullakko |
|--------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Näytteitä    | 25919              | 25919              | 25919                |
| Keskiarvo    | -3,3               | -3,4               | -3,6                 |
| Keskihajonta | 3                  | 3,2                | 3,1                  |
| Pienin       | -16,1              | -12,8              | -10,7                |
| Alaneljännes | -5,4               | -5,7               | -5,8                 |
| Mediaani     | -4,5               | -4,6               | -4,8                 |
| Yläneljännes | -2,3               | -2,2               | -2,7                 |
| Suurin       | 8                  | 6,7                | 4                    |

#### 5.4 Paine-erolähttimen asennuskorkeuden vaikutus mittaustulokseen

Keväällä 2020 suoritetun vertailumittauksen hetkellisistä mittauksista ja pidemmän ajan keskiarvomittauksista voidaan havaita, että mittausjärjestelmän mittaustulokset erosivat kerroksesta suoraan ikkunanraosta mitatuista tuloksista huomattavasti kuten kuvista 50 ja 51 nähdään. Tuloksissa esitetty data on kerätty 5 minuutin välein otetuilla näytteillä ja niiden perusteella on laskettu tunnin liukuva keskiarvo. Keltaisella näkyy rakennusautomaatiojärjestelmästä otettu data ja sinisellä ARE Oy:n wAreless -järjestelmästä otettu data.



Kuva 50. Paine-erojen vertailumittauksia A-osan 3.krs



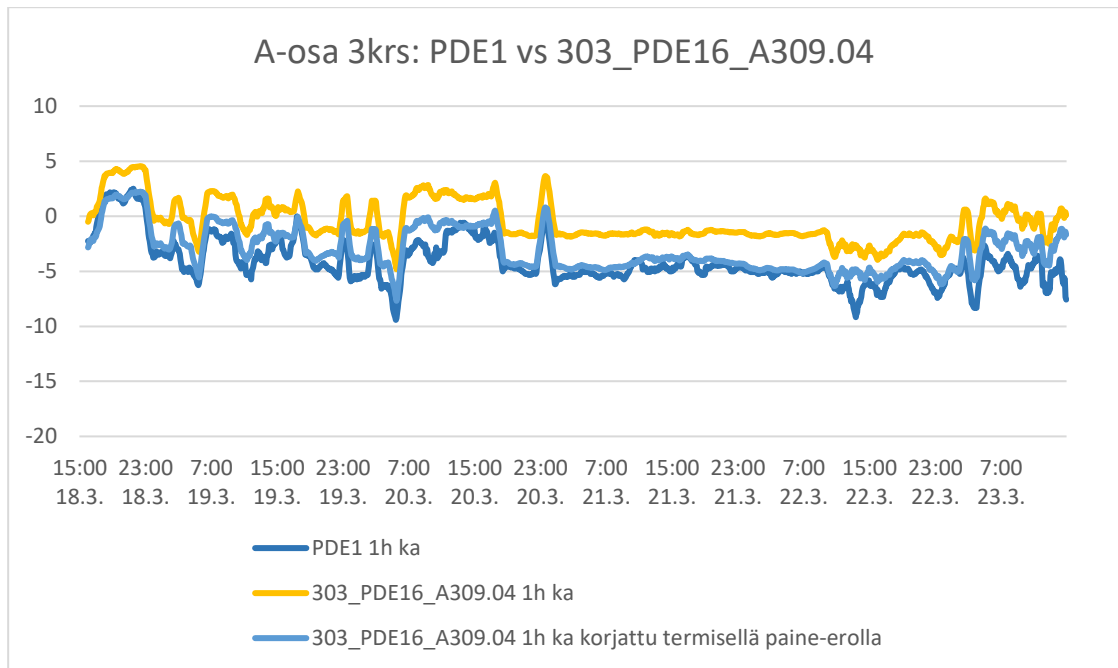
Kuva 51. Paine-erojen vertailumittauksia C-osan 1.krs

Tuloksista oli havaittavissa, että mitä suurempi korkeusero paine-erolähettimen ja sisämittauspisteen välillä oli, sitä suuremmaksi kasvoi ero vertailumittauksen tulokseen.

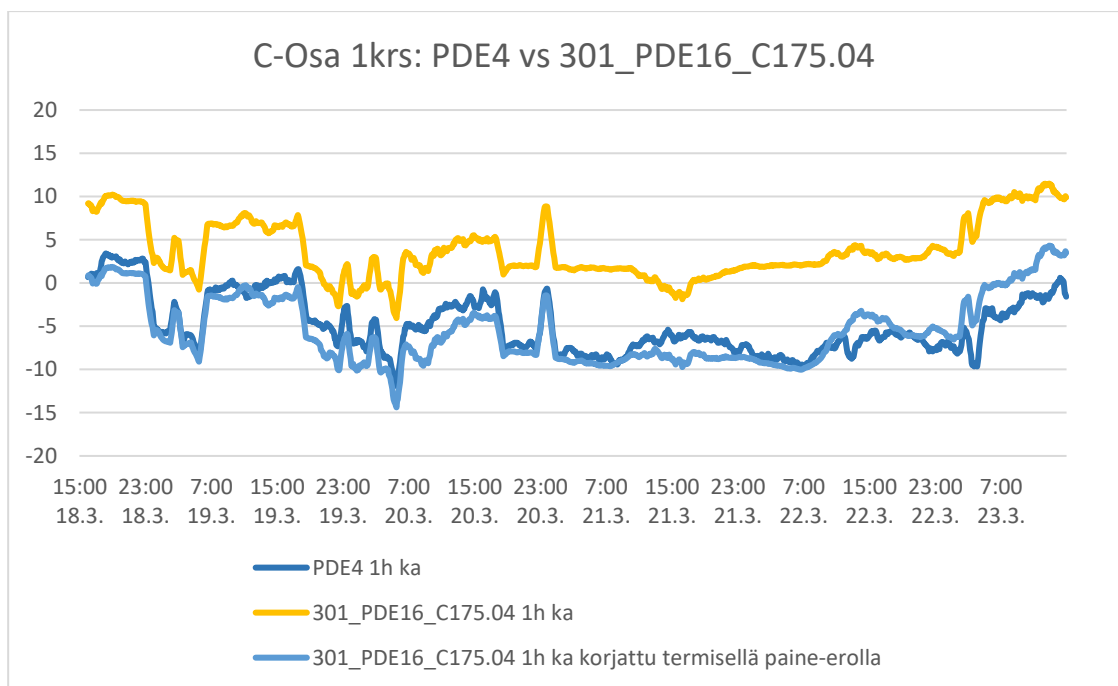
Mittausten eroavaisuus johtuu rakennuksen yläosassa sijaitsevien paine-erolähettimien ulkoreferenssi-impulssiputken ja sisämittauksen impulssiputken välille savupiippuvaikutuksen aiheuttamasta paine-erosta.

Kuvista 52 ja 53 voidaan todeta, että huomioimalla impulssiputkessa syntyvä hormivaikutus päästään rakennuksen yläkertaan sijoitetuilla paine-erolähettimillä hyvin lähelle samaa mittaustulosta kuin mittaamalla paine-ero huonetilasta ulkoreferenssin ollessa samalla korkeudella. Eron vaikuttavat myös antureiden mittausvirheet. Kuvissa tummansinisellä värillä on esitetty wAreless -järjestelmän paine-eromittaus, joka on asennettu tilaan n. 1 m korkeuteen ja ulkoreferenssi johdettu ulos ikkunan raosta samalla korkeudella. Keltaisella värillä kuvassa on esitetty rakennusautomaatiojärjestelmän paine-eromittaus, jossa lähetin sijaitsee rakennuksen ylimmässä kerroksessa. Vaaleansinisellä värillä esitetään rakennusautomaatiojärjestelmän paine-eron mittausta, jossa on huomioitu impulssiputkessa syntyvä hormivaikutus laskemalla tulos aikaisemmin mainitun kaavan 6 mukaisesti.





Kuva 52. Paine-erojen vertailumittauksia A-osan 3.krs savupiippuvaikutus huomioituna



Kuva 53. Paine-erojen vertailumittauksia C-osan 1.krs savupiippuvaikutus huomioituna

Varsinaisen tutkimuskohteen lisäksi tehdyt paine-eron vertailumittauksien tulokset tutkimuskohteissa A ja B nähdään taulukoista 6 ja 7. Tuloksissa esitetty aineisto on kerätty 5 sekunnin välein otetuista näytteistä.

Taulukoissa 6 ja 7 "Automaatio raaka" -arvo kuvaa rakennusautomaatiojärjestelmästä luettua arvoa, jota ei ole käsitelty mitenkään. "Automaatio korjattu" -arvo on laskettu rakennusautomaatiojärjestelmän ala-asemassa huomioiden

paine-ero lähettimien impulssiputkissa hormivaikutuksesta syntyvä paine-ero. "Mittalaite" -arvo on mittalaiteella huonetilasta suoraan mitattu arvo. Viimeisenä "Laskettu oikealla hormin korkeudella" -arvo on laskettu käyttämällä "Automaatio raaka" -arvoa, ulkoilmanlämpötilaa ja horminkorkeutta. Laskenta on suoritettu aikaisemmin mainitun kaavan 6 avulla.

Taulukko 6. Paine-eromittauksien vertailu tutkimuskohde A

| Ajankohta                                   |        | 14.1.2021             | Mittalaite       | TSI Velocicalc      |            |                                      |
|---|--------|-----------------------|------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|
| Ulkolämpötila                               |        | -22,8°C               | Sarjanumero      | 9565P2043022        |            |                                      |
|   |        |                       | Kalibroitu       | 21.10.2020          |            |                                      |
| Mittausjakson laskettu paine-eron keskiarvo |        |                       |                  |                     |            |                                      |
| Tila  | kerros | Mittausjakso          | Automaatio raaka | Automaatio korjattu | Mittalaite | Laskettu oikealla hormin korkeudella |
| 205   | 2      | 10:05:21-<br>10:15:11 | 6,4 Pa           | 0,2 Pa              | -4,5 Pa    | -3,5 Pa                              |
| 229   | 2      | 10:26:51-<br>10:36:41 | 8,5 Pa           | 2,3 Pa              | -0,9 Pa    | -1,4 Pa                              |
| 142   | 1      | 10:44:15-<br>10:54:05 | 4,1 Pa           | -8,2 Pa             | -13,1 Pa   | -12,6 Pa                             |
| 111   | 1      | 10:59:05-<br>11:08:55 | 3,4 Pa           | -9,0 Pa             | -14,9 Pa   | -13,3 Pa                             |
| 53  | pohja  | 11:16:22-<br>11:26:12 | 4,3 Pa           | -14,1 Pa            | -16,7 Pa   | -16,8 Pa                             |
| 22  | pohja  | 11:34:35-<br>11:44:25 | 1,0 Pa           | -17,4 Pa            | -22,3 Pa   | -22,1 Pa                             |
| 04  | pohja  | 11:52:04-<br>12:01:54 | 8,8 Pa           | -9,5 Pa             | -14,3 Pa   | -14,8 Pa                             |

Taulukko 7. Paine-eromittauksien vertailu tutkimuskohde B

| Ajankohta                                   |        | 25.1.2021             | Mittalaite       | TSI Velocicalc      |            |                                      |
|---|--------|-----------------------|------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|
| Ulkolämpötila                               |        | 1,3°C                 | Sarjanumero      | 9565P2043022        |            |                                      |
|   |        |                       | Kalibroitu       | 21.10.2020          |            |                                      |
| Mittausjakson laskettu paine-eron keskiarvo |        |                       |                  |                     |            |                                      |
| Tila  | kerros | Mittausjakso          | Automaatio raaka | Automaatio korjattu | Mittalaite | Laskettu oikealla hormin korkeudella |
| 7033  | 7      | 12:56:12-<br>13:06:02 | -7,2 Pa          | -6,7 Pa             | -11,1 Pa   | -10,5 Pa                             |
| 6002  | 6      | 13:15:15-<br>13:25:10 | -4,5 Pa          | -7,6 Pa             | -11,7 Pa   | -10,6 Pa                             |
| 6022  | 6      | 13:31:06-<br>13:41:01 | -1,1 Pa          | -10,9 Pa            | -11,9 Pa   | -10,5 Pa                             |
| 4002  | 4      | 13:52:02-<br>14:01:57 | -3,5 Pa          | -11,5 Pa            | -15,5 Pa   | -14,4 Pa                             |
| 1030  | 1      | 14:13:12-<br>14:23:07 | 3,4 Pa           | -18,2 Pa            | -20,8 Pa   | -17,8 Pa                             |

Taulukon 6 ja 7 tulosten perusteella voidaan havaita, että asennustavalla, jossa paine-ero lähettimet asennetaan ilmanvaihtokonehuoneeseen, voidaan päästä tuloksiin, jotka mahtuvat mittalaitteen (1 % lukemasta  $\pm 1$ Pa) ja paine-ero lähettimien ( $\pm 0,5$ Pa  $\pm 1$  % lukemasta) tarkkuuksien sisälle. Ainoastaan tutkimuskohteen B tilan 1030 mittauksen välillä ero on suurempi kuin laitteiden ilmoitettu tarkkuus.

Tulosten perusteella voidaan myös havaita, että tässä asennustavassa on äärimmäisen tärkeää määrittää tarkasti paine-erolähettimen ulkoreferenssi-impulssiputken ja mitattavan tilan välinen korkeus. Molemmissa tutkimuskohdeissa korkeudet ala-asemassa tapahtuvaa korjauslaskentaa varten oli määritetty arvioimalla huonekorkeus eikä mittaamalla tai varmistamalla sitä tasokuvista.

## 6 POHDINTA

Rakennuksen vaipan yli mittavaa paine-eroa voidaan hyödyntää hyvin ilmanvaihdon toiminnan varmistamiseen tiiviissä rakennuksissa. Paine-eromittauksen perusteella voidaan helposti havaita rakennuksen ilmanvaihdon ongelmat, kuten epäsymmetrisesti asetellut käyntiajat. Rakennuksien ja käyttö-

tarpeiden ollessa jatkuvien muutoksien alla jatkuvatoimisella mittausjärjestelmällä pystytään puuttumaan paine-eroista johtuviin ongelmiin kohtiin reaaliaikaisesti.

Osana ilmanvaihdon toimivuuden ja helppokäyttöisyyden parantamiseen voisi olla muutos ajattelussa, kuinka eri talotekniikan järjestelmiä ohjataan. Pitäisi siirtyä vanhasta yksittäisten järjestelmien ohjausajattelusta ajatteluun, jossa rakennukselle määritellään erilaisia käyttötilanteita ja talotekniikan järjestelmät käynnistyisivät automaattisesti käyttötilanteen mukaan. Käyttötilanteet aseteltaisiin aikaohjelmien mukaisesti tai parhaassa tapauksessa havaittaisiin tarvittavien sensorien avulla. Näin vähenisi huoltohenkilöstöltä mahdollisuus asettaa ristiriitaisia aikaohjelmia toisistaan riippuville prosesseille.

Paine-erolähtettimeiden kiinteä asennus vaatii paljon työtä varsinkin, kun se tehdään käytössä olevaan rakennukseen. Tämän rakennuksen osalta paine-erolähtettimeiden ja muiden laitteiden asennus vei aikaa kahdelta henkilöltä noin viikon. Tämän lisäksi kohteessa suoritettiin avustavia rakennusteknisiä töitä, kuten läpivientien tekoa ja ummistusta, kahden henkilön toimesta noin kahden päivän ajan. Langattomilla paine-erolähtettimeillä asennusaikaa voidaan merkittävästi lyhentää. Tässä kohteessa haluttiin mittauksen perusteella säätää ilmanvaihtoa, joten 15–30 minuutin lähetysaika katsottiin liian pitkäksi. Tässä työssä käytettyjä paine-erolähtettimeitä voidaan käyttää myös langattomasti liitämällä ne erilliseen langattomaan lähettimeen ja vastaanottimen, joita tässä työssä myös käytettiin kahden vertailulähtettimeen osalta. Tällainen ratkaisu vaatii kuitenkin käyttösähkön toimiakseen, ja siten ne eivät ole täysin langattomia. Langattomien paine-eroanturien kehittämisessä tarvitaan innovaatioita, joilla niiden asennusteknisiä ominaisuuksia parannetaan ja anturin mittauksen lähetysväliä voidaan tihentää ja patterin sähkövarauksen kestoa pidentää. Asennusteknisesti langattoman paine-eroanturin koko tulisi saada pienemmäksi, jolloin sen voitaisiin asentaa sisä- ja ulkoikkunan väliin ja parhaassa tapauksessa ainoaksi läpivienniksi riittäisi lävistys ikkunan alareunasta samantyyliisesti kuin sälekaihtimen narujen läpivienti.

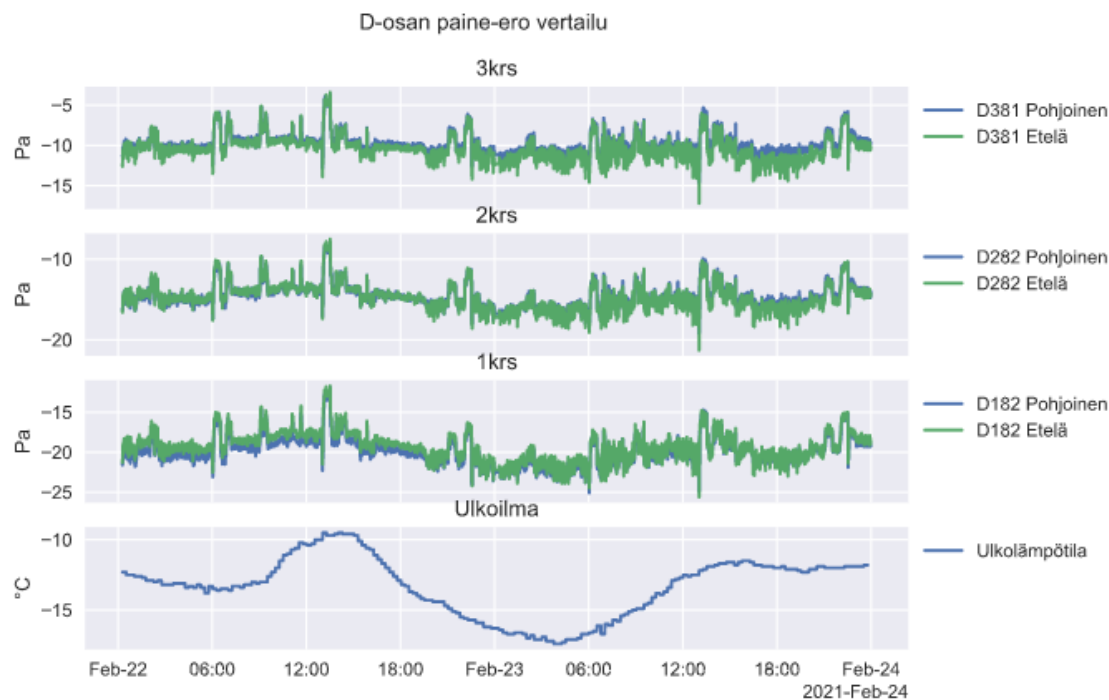
Ilmanvaihtokoneiden paine-ero säätö voidaan tulosten perusteella todeta toimivan osittain. Työn alussa oli oletus, että rakennuksen eri osat ja niiden ilma-

vaihtokoneiden palvelualueet olisivat tiiviitä toisiinsa nähden. Asia tuli havaittua kohteessa käyntien yhteydessä, mutta tiedostettua vasta tuloksien tulkinnan yhteydessä. Paine-eron säätötapaa tulisi jatkokehittää toimivaksi tällaisissa rakennuksen osissa, joissa ilmanvaihtokoneiden palvelualueet yhtyvät. Tämä olisi toteutettavissa ainakin muutamalla eri vaihtoehdolla. Palvelualueiden yhtyvällä osalla paine-erolle olisi yksi säädin, jonka mukaan säädettäisiin nykyisen säätölogiikan mukaisesti kaikkien ilmanvaihtokoneiden kanavapaineasetuksia yhtäaikaisesti kaikkien koneiden puhaltimien osalta. Toisena vaihtoehtona olisi ajaa yhden paine-erosäätimen perusteella ilmanvaihtokoneita vaiheittain. Tässä tapauksessa paine-eron säätön osallistuisi ensin yksi ilmanvaihtokone, ja mikäli sen kapasiteetilla ei saataisi paine-eroa säädettyä asetukseen, lisättäisiin säätöön osallistuvia koneita portaittain. Säätötavassa olisi huomioitava se, että ensimmäisenä tarvittavan puolen ilmamääriä kasvatettaisiin kaikkien koneiden osalta ennen kuin vastakkaisen puolen ilmamääriä alettaisiin vähentämään.

Paine-erosäätö oli säädetty reagoimaan hitaasti paine-eron muutoksiin. Säätöä olisi luultavasti mahdollista nopeuttaa hieman, jotta se reagoisi paremmin muutoksiin. Viritysparametrit on kuitenkin haettava kohdekohtaisesti ja varottava, ettei säätö lähde huojumaan.

Nykyisellä säätötavalla paine-erosäätimen mittauksena käytetään palvelualueen paine-eromittausten keskiarvoa. Tämä karkeasti tarkoittaa sitä, että säädössä käytetään tässä rakennuksessa 2.kerroksen mittausta. Kuvasta 54 voidaan havaita, että pakkaskelillä kerrosten väliset paine-erot ovat n. 5 Pa luokkaa. Tämä aiheuttaisi sen, että mikäli paine-ero pyrittäisiin pitämään 0 Pa:ssa,

olisi silloin kolmannen kerroksen paine-ero jo n. 5 Pa ylipaineisena.



Kuva 54. D-osan paine-erot pakkaskelillä

Paine-erojen hallinta kerroskohtaisesti vaatisi aktiivisia laitteita, joilla pystytäisiin säätämään tulo- ja poistoilmamäärää muista kerroksista riippumatta. Rakennuksessa, jossa ei ole mahdollisuutta hallita kerroskohtaisia ilmamääriä olisi syytä käyttää paine-erosäätimen mittauksena kerrosten suurinta paine-ero mittausta. Tällä tavoin vältyttäisiin rakennuksen jonkin osan menemistä yli-paineiseksi.

Paine-erolähettimeiden vertailussa lyhyellä jaksolla ei ollut havaittavissa eroavaisuutta kahden eri valmistajan laitteissa. Asiaa olisi mielenkiintoista tutkia myös esimerkiksi viiden ja kymmenen käyttövuoden jälkeen.

Paine-erolähettimeiden ulkoreferenssin sijoittaminen tuulettuvaan ullakotilaan voidaan tulosten valossa pitää mahdollisena asennuspaikkana tämän suodattaessa suurimpia tuulen aiheuttamia piikkejä paine-eron mittaustuloksista. Sovellutus edellyttää kuitenkin tuulettuvaa ullakotilaa. Tutkimuskohteen ullakko tuulettui räystäältä rakennuksen kaikilta sivuilta.

Työssä käytetty menetelmä asentaa paine-erolähteet ilmanvaihtokonehuoneeseen rakennuksen ylimpään kerrokseen aiheutti pohdintaa mistä mittausten ja kerroksesta suoraan mitatun paine-eron eroavaisuus johtui. Asia selittyi

paine-eron impulssiputkessa syntyvästä hormivaikutuksesta, joka johtuu sisä- ja ulkolämpötilojen erosta. Tämän asennustavan parhaana puolena voidaan pitää sitä, että käyttäjien tiloihin ei tule näkyviä asennuksia ja ylimääräistä tekniikkaa. Paine-erolähtimet sijaitsevat keskitetysti teknisissä tiloissa, ja laitteiden huolto ja varmistusmittaukset on mahdollista tehdä häiritsemättä käyttäjiä. Haasteina tässä asennustavasta on se, että ulkoreferenssin ja mitattavien tilojen korkoasemat tulee tietää tarkasti. Yhden metrin heitto korkeudessa vaikuttaa 20°C sisä- ja ulkolämpötilojen erolla n. 1 Pa virheen tulokseen.

Korjauslaskentaa varten tarvitaan tieto sisä- ja ulkoilmanlämpötilasta. Sisälämpötilana laskennassa voidaan käyttää vakiota, rakennusautomaatiolla mitattua ilmanvaihtokoneen poistoilmanlämpötilaa tai kerroksista sijaitsevista huonelämpötiloista laskettua keskiarvoa. Paine-eron sisäputkituksen tulisi kulkea rakennuksen pystysuunnalla tasalämpöisissä tiloissa, joiden lämpötila vastaa korjauslaskennassa käytettävää mittausta. Ulkolämpötilan mittauksen kannalta ongelmia voi aiheuttaa anturin sijainti. Mikäli anturi on sijoitettu väärin muualla kuin pohjoisseinälle, voi auringonpaiste esimerkiksi keväällä lämmitteä mittausta useita asteita ja aiheuttaa virheen paine-eron korjauslaskentaan. Tässä kohteessa rakennuksen ulkoreferenssin ja ensimmäisen kerroksen korkeusero on 8,8 m. Tällä korkeuserolla yhden asteen ero sisä- ja ulkolämpötilan erotuksessa aiheuttaa 0,5 Pa virheen tulokseen. Näiden tulosten perusteella on suositeltavampaa käyttää paine-erolähtimien asennuksessa asennustapaa, jossa lähtimet asennetaan suoraan huonetilaan. Tämän tutkimuksen kaltainen asennustapa on kuitenkin käyttökelpoinen kohteissa, joissa asennuksia ei voida tehdä suoraan mitattavaan tilaan. Rakennuksen vaipan lävistäminen paine-eroletkua varten ei ole aina mahdollista, tai on teknisesti vaikea suorittaa ja rakennuksen vaipan lävistykset voivat aiheuttaa kosteusvaurioriskin rakenteille. Tällöin tulee tiedostaa asennustavan aiheuttamat haasteet.

Korjauslaskentaa suoritettaessa on myös huomioitava, että korjattu lukema on saatavissa ainoastaan rakennusautomaatiojärjestelmästä. Näin ollen paikallisen paine-erolähtimen näytön mittaustulos ei anna todellista kuvaa mitatun tilan paine-eroista. Tästä johtuen virhetulkintojen välttämiseksi voi olla perusteltua käyttää paine-erolähtiminä malleja, joissa ei ole näyttöjä. Paine-erolä-

hetin, jossa olisi mahdollisuus esittää sekä mitattu että korjattu lukema näytöllä vaatisi tuotekehitystä laitevalmistajilta, jotta rakennusautomaatiojärjestelmässä korjattu lukema saataisiin näkymään lähettimen näytöllä.

Rakennuksen vaipan yli olevan paine-eron mittaaminen on tarkkuutta vaativa asia, ja sen mittaamisessa on tunnistettava siihen vaikuttavat ulkoiset häiriötekijät. Paine-erolähtimien asennuksissa on syytä huomioida erilaisten asennustapojen mukanaan tuomat ominaisuudet, jotka on huomioitava mittaustuloksia tarkasteltaessa. Paine-eron mittauksen mukaan on mahdollista säätää ilmanvaihtokoneen ilmamääriä tiiviissä rakennuksissa. Tässä työssä käytetty säätötappaa tosin vaatii vielä lisää kehitystyötä. Paine-erolähtimien mahdollisen rikkoutumisen havaitseminen muiden rakennusautomaation mittausten perusteella ja kahden samassa tilassa olevan mittauksen vertailu tuulettomassa säätötilanteessa ovat asioita, joilla säätötavasta saadaan entistä varmatoimisempi.



## LÄHTEET

Björkroth, M., Eskola, L. 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraportti.

D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö.

HK Instrument Oy. 2021. Tuotetiedot käytetyistä ilmamäärälähetimistä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://hkinstruments.fi/fi> [viitattu 14.5.2021].

Kattoliitto ry. 2019. Toimivat katot 2019. Vaasa: Kattoliitto ry.

Keskikuru, T. 2018. Various Factors of Pressure-Driven Entry of Soil Gas into a Detached House Through Concrete Foundation. Measurements, Statistical Analysis and Crawl Space Modelling. Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4283-1> [viitattu 17.5.2021]

Kuurola, P. 2016. Ilmanvaihtolaitteiston aiheuttama paine-ero rakennuksen vaipan yli. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201605183994> [viitattu 9.4.2021]

Paloniitty, S. 2013. Rakennusten tiiviysmittaus. *Rakentajan kalenteri 2013*, 155–161.

Pitkäranta, M. (toim.) 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kunto-tutkimus. Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto. Helsinki 2016

Produal Oy. 2021. Tuotetiedot käytetyistä paine-erolähetimistä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.produal.com/fi/> [viitattu 12.4.2021].

Projektiutiset. 2011. WWW-dokumentti. Päivitetty 2.2.2011. Saatavissa: <https://www.projektiutiset.fi/kuopion-verotalo-arvorakennuksen-suunnittelua-ohjasi-elinkaarimalli/> [viitattu 9.4.2021].

Päkkilä, T. 2012. Mikrobin kulkeutuminen sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta. Aalto-yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2020122858761> [viitattu 9.4.2021]

Rickhard, F. 2016. Impact of Stack Effect on Building Static Pressure Measurement. *ASHRAE JOURNAL* October 2016, 26–32

Sandberg, E. 2014. Ilmastointitekniikka osa 1. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Tampere: Talotekniikka julkaisut Oy.

Sandberg, E. 2016. Ilmastointitekniikka osa 2. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Forssa: Talotekniikka julkaisut Oy.

Saxholm, S. & Rantanen, M. 2011. Paineen mittaus, Julkaisu J1/2011. MIKES Mittatekniikan keskus

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy

Suomäki, J. & Vepsäläinen, S. 2017. Talotekniikan automaatio – käyttäjän opas. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus Oy

Sähköinfo Oy 2018. Rakennusautomaatiojärjestelmät, ST-käsikirja 17. Espoo: Sähköinfo Oy

Talotekniikkainfo. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. WWW-dokumentti. Päivitetty 10.06.2020. Saatavissa: <https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas> [viitattu 31.3.2021]

Using Pressure Sensors Over a High Dynamic Range. 2020. First Sensor Ltd. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://blog.first-sensor.com/en/using-pressure-sensors-over-a-high-dynamic-range> [viitattu 5.5.2020]

Vaisala Oy. 2021. Tuotetiedot käytetyistä paine-erolähetimistä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/fi> [viitattu 12.4.2021].

Ympäristöministeriön Tasauslaskentaopas 2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-\(002\)-8DA891B6\\_94AC\\_4367\\_9E45\\_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-\(002\)-DA891B6\\_94AC\\_4367\\_9E45\\_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-(002)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskentaopas-2018-310317-181217-(002)-DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564) [viitattu 31.3.2021].

## Vertailumittauksen suoritusohje

|                         | nro        | Laite                                  | Toimenpide   |
|-------------------------|------------|--|--|
| Valmistelevat toimet    | 0          | VAK                                    | Laitetaan ala-asemaan tosibox etäyhteyttä varten, mikäli mahdollista   |
|                         | 1          | Muu                                    | Varmistetaan ulkoreferenssien korkeusasemat, ilmansuunnat ja kirjataan ylös  |
|                         | 2          | VAK                                    | Varmista ja kirjaa ylös käytetyt hormin korkeudet  |
|                         | 3          | Mittalaite                             | Laita virrat päälle mittalaitteeseen   |
|                         | 4          | Mittalaite / VAK                       | Aseta kellonajat yhteneviksi mittalaitteeseen ja ala-asemaan   |
|                         | 5          | Paine-ero lähettimet                   | Varmista ja kirjaa ylös käytetyistä lähettimistä aikavakio   |
|                         | 6          | Mittalaite                             | Valitse aikavakioksi rakennusautomaation paine-ero lähettimiä vastaava aikavakio. (PEL-N 2s -> 2s ja 8s->10s) Mikäli tuuliinen keli voi aikavakio pidentää luotettavamman mittaustuloksen saamiseksi. Aikavakio on valitun määrän liukuva keskiarvo. Varmista, että näytteenottoväli on 1s |
|                         | 7          | VAK                                    | Aseta ala-aseman painemittaukset historia trendeihin. Raaka mittaus sekä korjattu. 5s tiedon keruu välillä ja 0,1 muutoksella  |
|                         | 8          | Mittalaite                             | 5min kuluttua paine-ero lähettimen virtojen kytkemisen jälkeen Irroita mittaletkut ja kalibroi paine   |
| Jokaiselle mittaukselle | 9          | Mittalaite                             | Asetetaan mittalaitteen referenssiletku ulos 1.m korkeudelta ja varmistetaan lukema, että on järkevä. Tarkkaile kuparin ja ohuen silikoni letkun liitosta, ettei tule nirhaumia  |
|                         | 10         | Mittalaite                             | Mikäli ei päästä mittamaan samasta tilasta kuin paine-ero lähettimet asennettu. Tasataan tilojen paineet joko ovia avaamalla tai vaihtoehtoisesti referenssiletkun viennillä   |
|                         | 11         | Mittalaite /VAK                        | Verrataan lukemia mittalaitteen ja ala-aseman välillä  |
|                         | 12         | VAK                                    | Varmistetaan, että mittauspiste on trendeissä  |
|                         | 13         | Mittalaite                             | Aloitetaan 10min loggaus jakso   |
|                         | 14         | Muut                                   | Mitataan paine-ero lähettimen huonetilan referenssiputken korkeus lattiasta  |
|                         | 15         | Muut                                   | Mitataan paine-ero mittalaitteen korkeus lattiasta ja ulkoreferenssin mikäli näissä eroja  |
|                         | 16         |  | Kun 10 min loggaus ohi siirry seuraavaan mittaukseen ja aloita kohdasta 9. Mikäli viimeinen mittaus siirry kohtaan 17  |
|                         | 17         | VAK                                    | Ota historia trendit talteen   |
| 18                      | Mittalaite | Ota historia tiedot talteen laitteesta |  |

**Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet ja niiden ominaisuudet**

| Valmistaja     | Malli             | Tarkoitus           | Mittausalue  | Tarkkuus  |
|----------------|-------------------|---------------------|--|---|
| Vaisala        | PDT101            | Paine-erolähetin    | $\pm 60$ Pa, $\pm 125$ Pa, $\pm 0.25$ inH <sub>2</sub> O, $\pm 0.5$ inH <sub>2</sub> O<br>Valittava tilattaessa                              | 0,4 %<br>mittausalueesta  |
| Produal        | PEL-N             | Paine-erolähetin    | 0...100 Pa, 0...200 Pa,<br>0...500 Pa, 0...1000 Pa,<br>$\pm 50$ Pa, $\pm 100$ Pa, $\pm 250$ Pa,<br>$\pm 500$ Pa<br>Valittavissa lähettimestä | $\pm 0,5$ Pa $\pm 1$ %<br>lukemasta (25 °C)   |
| TSI            | Velocicalc 9565-P | Monitoimimittari    | $\pm 3735$ Pa  | 1 % lukemasta $\pm 1$ Pa  |
| HK Instruments | DPT-Flow-7000     | Ilmanvirtauslähetin | 700-7 000 Pa   | Paine < 125 Pa = 1,5 % + $\pm 2$ Pa<br>Paine > 125 Pa = 1,5 % + $\pm 1$ Pa              |
| Davis          | 6410              | Tuulianturi         | tuulennopeus 0,5-89 m/s  | tuulensuunta $\pm 3^\circ$ ,<br>tuulennopeus 1 m/s<br>tai $\pm 5\%$ , kumpi on suurempi |