

Helena Noetzel

RAKENNUSTEN PAINE- EROMITTAUSTEN TULOSTEN KÄSITTELY- JA ESITYSTAVAT

Opinnäytetyö

Tekniikan alan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Ympäristötekniologia

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (ylempi AMK)
Tekijä	Helena Noetzel
Työn nimi	Rakennusten paine-eromittausten tulosten käsittely- ja esitystavat
Toimeksiantaja	A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Vuosi	toukokuu 2021
Sivut	43 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaajat	Hanna Jylkkä, Lari Eskola

TIIVISTELMÄ

Ympäristöministeriö on syksyllä 2019 julkaissut Rakennusten paine-erojen mittausohjeen. Paine-eromittauksille ei aikaisemmin ole ollut selkeää ohjeistusta, jossa olisi huomioitu ilmanvaihtojärjestelmä, lämpötila ja mittauksiin vaikuttavien häiriötekijöiden vaikutus mittaustuloksiin. Mittausten ja tulosten tulokinnan osalta on ollut vaihtelua eri toimijoiden välillä, joten ohjeistuksen avulla on ollut tarkoitus yhtenäistää toimintatapoja. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on osoittaa paine-erojen mittausohjeessa esitettyjen mittaustapojen käytännön hyöty, kun mittaukset tehdään ja mittaustuloksia käsitellään ohjeen mukaisin menetelmin.

Tähän opinnäytetyöhön tarkastelun kohteiksi valittiin mittausjakson pituus, mitaustiheys, terminen paine-ero, numeeriset ja graafiset esitystavat sekä mittauksiin vaikuttavat häiriötekijät kuten ilmanvaihdon ongelmat, tuuli, lämpötila ja rakennuksen käyttö. Tutkimusaineistona tässä työssä oli kahden koulurakennuksen paine-eromittausten tulokset. Ensimmäisen kohteen mittausjakso marraskuussa 2019 saatiin voimakkaasti alipaineisen tilanteen aineistoa ja toukokuun 2020 mittauksesta aineistoa tasapainotilanteesta. Lisäksi mitaustaineistoa oli kohteesta, jossa tehtiin poikkeamapiikkien selvitystä lyhyellä mittausvälillä.

Paine-eromittaustuloksista laskettiin termisellä paine-erolla korjatut tulokset, tarkasteltiin laskennallisesti ja kuvaajien avulla mittausjakson pituutta, mitaustiheyttä, keskiarvon, mediaanin, minimin ja maksimin arvoja. Pysyvyyskäyriä arvioitiin termisen paine-eron kompensoinnin hyödyn kannalta. Perinteisiä kuvaajia tarkasteltiin tavanomaisena kuvaajana ja liukuvalla keskiarvolla muokattuna, jolloin saatiin tiheän vaihtelun kuvaajasta paremmin kokonaiskuva siitä millä tasolla käyrä enimmäkseen on.

Tämän tutkimuksen mukaan Rakennusten paine-erojen mittausohjeen mukaisesti voidaan laskea termisellä paine-erolla kompensoituja tuloksia huomattavastikin poikkeaville korkeuksille luotettavasti. Mittausohjeen 1–2 viikon mittausjakson pituus on tarpeellinen luotettavien tulosten saamiseksi. Paine-eromittauksiin kohdistuvien mittausvirheiden poistamiseksi voidaan tämän tutkimuksen mukaan käyttää 10 %:n kriittisyysrajaa, jolloin ääriarvoina esiintyviä mittausvirheitä saadaan poistettua mittaustuloksista.

Asiasanat: paine-ero, mittaus, kuvaaja, pysyvyys, terminen, ilmanvaihto

Degree	Master of Engineering
Author	Helena Noetzel
Thesis title	Processing and presenting the differential pressure measurement results of buildings
Commissioned by	A- Insinöörit Suunnittelu Oy
Time	May 2021
Pages	43 pages, 4 pages of appendices
Supervisors	Hanna Jylkkä, Lari Eskola

ABSTRACT

In the autumn of 2019, the Finland's Ministry of the Environment published guidelines for measuring pressure differences in buildings. In the past, there have been no clear guidelines for differential pressure measurements which would have taken into account the ventilation system, the effect of temperature and disturbances affecting the measurement results. Because with regard to the interpretation of measurements and results there has been variation between different actors, the purpose of the guidelines has been to harmonize operating methods. The aim of this thesis was to demonstrate the practical usefulness of the measurement methods presented in the pressure difference measurement guidelines when measuring and processing the measurement results in accordance with the guidelines.

The length of the measurement period, measurement density, thermal pressure difference calculation, numerical and graphical representations as well as disturbance factors affecting the measurements such as ventilation problems, wind, temperature and use of the building were selected for consideration in this thesis. In the measurement period of the first site in November 2019, data on a strongly vacuum situation and data from the May 2020 measurement at equilibrium were obtained. In addition, measurement data were available from a site where deviation peaks were investigated over a short measurement interval. From the differential pressure measurement results, the results corrected for thermal pressure difference were calculated, the length of the measurement period and the measurement density, mean, median, minimum and maximum values were examined by calculation and with the help of graphs. The stability curve was evaluated for the benefit of thermal pressure difference compensation. Traditional graphs were viewed as a conventional graph and modified with a moving average to receive a better overall picture of the level of the curve on the graph of dense variation.

According to the measurement guidelines for pressure differences in buildings, the results compensated by the thermal pressure difference could be calculated reliably for significantly different heights. The length of the 1 to 2 weeks' measurement period of the measurement guidelines is necessary to obtain reliable results. To eliminate measurement errors for differential pressure measurements, a 10% criticality limit can be used, at the extremes of which measurement errors are obtained from the measurement results.

Keywords: differential pressure, measurement, graph, permanence, thermal, ventilation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	ILMANVAIHTO JA PAIN-EERO.....	7
2.1	Ilmanvaihdon tarkoitus.....	7
2.2	Paine-ero rakennuksissa	8
2.3	Uudet rakennukset.....	9
2.3.1	Koulurakennusten erityispiirteet.....	10
2.4	Rakennusten paine-erojen mittausohje	11
2.5	Paine-eromittaukset.....	12
2.5.1	Hetkelliset mittaukset.....	12
2.5.2	Seurantamittaukset.....	13
2.6	Paine-eromittaukseen vaikuttavat tekijät	13
2.6.1	Ilmanvaihtojärjestelmien vaikutus paine-eroon	13
2.6.2	Terminen paine-ero	14
2.6.3	Tuulen vaikutus.....	16
2.7	Paine-erojen laskenta ja tulosten esitys tavat.....	16
3	TUTKIMUSAINEISTO JA -MENETELMÄT.....	18
3.1	Mittauskohteet	18
3.2	Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet.....	18
3.3	Mittauskohteista saatu aineisto.....	19
3.3.1	Mittausjakson pituus	20
3.3.2	Mittaustiheys.....	20
3.3.3	Termisellä paine-erolla kompensoidut mittaustulokset	21
3.4	Tulosten esitystavat.....	24
3.4.1	Numeerinen laskenta	24
3.4.2	Perinteinen kuvaaja	24
3.4.3	Liukuva keskiarvo	25
3.4.4	Pysyvyyskäyrä	25

4	TUTKIMUSTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	25
4.1	Mittausjakson pituuden tarkastelu.....	25
4.2	Mittaustiheyden tarkastelu	27
4.3	Laskennalliset tulokset.....	28
4.4	Perinteisten kuvaajien tarkastelu	29
4.4.1	Liukuvan keskiarvon vaikutukset tuloksiin.....	34
4.5	Pysyvyyskäyrien tarkastelu.....	35
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	38
	LÄHTEET.....	41
	LIITE	

Liite 1. Paine-eromittaustulokset eri pituisissa jaksoissa

1 JOHDANTO

Rakennusten paine-eromittauksia on tehty pitkään, mutta niiden merkitys kasvaa nyt ja tulevaisuudessa voimakkaasti. Energiatehokkuusvaatimusten kiristyessä rakennetaan yhä tiiviimpiä rakennuksia ja sen myötä törmätään yhä useammin kasvaviin painesuhteiden hallinnan haasteisiin. Erityisesti rakennusten voimakkaat yli- ja alipaineet vaikuttavat sisäilman laatuun tuodessaan rakenteiden kautta epäpuhtauksia sisäilmaan tai aiheuttaen mikrobivaurioriskin rakenteisiin.

Ympäristöministeriö on syksyllä 2019 julkaissut Rakennusten paine-erojen mittaushyönteeseen. Paine-eromittauksille ei ole aikaisemmin ollut selkeää ohjeistusta, jossa olisi huomioitu ilmanvaihtojärjestelmä, lämpötilan ja mittaushäiriöiden vaikutus mittaustuloksiin. Mittausten ja tulosten tulkinnan osalta on ollut vaihtelua eri toimijoiden välillä, joten ohjeistuksen avulla on ollut tarkoitus yhtenäistää toimintatapoja. Tavoitteena on osoittaa paine-erojen mittaushyönteeseen esitettyjen mittaustapojen käytännön hyönte ja ohjeen toimivuus, kun mittaukset tehdään ja mittaustuloksia käsitellään ohjeen mukaisin menetelmin sekä mittaushyönteeseen virhelähteet huomioidaan. Tähän opinnäytetyöhön tarkastelun kohteiksi valittiin mittaushyönteeseen pituus, mittaushyönteeseen, terminen paine-ero, tulosten laskenta, numeeriset ja graafiset esitystavat sekä mittauksiin vaikuttavat häiriötekijät, mm. ilmanvaihdon ongelmat, tuuli, lämpötila ja rakennuksen käyttö, liittyen tässä esitettyihin muihin osa-alueisiin. Tavoitteena on todentaa menetelmät, joiden avulla saadaan vertailukelpoisempia mittaustuloksia kuin mitä suoraan mittalaitteista saaduista mittaustuloksista on mahdollista saada aikaisemmin käytössä olevin mittaushyönteelmin.

Rakennusten paine-erojen mittaushyönteeseen (2019) sisällöstä tässä työssä keskitytään tulo-poistoilmanvaihdon toimiviin koulurakennuksiin ja jätetään tarkastelematta asuinrakennusten ja muiden rakennustyyppien erityispiirteet ja muiden ilmanvaihtoratkaisujen kuten poistoilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamien paine-erojen tarkastelu. Tämän työn ulkopuolelle rajataan eri ilmanvaihtojärjestelmien ja mittalaitteiden toimintaan liittyvät tarkastelut, joita molempia kuitenkin sivutaan tässä työssä. Työssä keskitytään tavanomaiseen paine-ero-

mittaukseen ja sen edellyttämiin tulosten korjaustapoihin. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään mittausohjeessa esitettyjen erityismittausjärjestelyjen toimivuuden arviointi ja rakennuksiin kiinteästi asennettavat mittaukset.

Paine-eromittauksia tehtiin kahdessa mittauskohteessa paine-eromittausohjeen mukaisesti ja koekäytettiin ohjetta mittaustulosten laskennallisissa menetelmissä. Työssä käytettiin koulurakennuksista saatuja tutkimuksen eri osaluueille soveltuvia seurantamittausjaksojen tuloksia sekä tutkimusten aikana kerättyä muuta tutkimustietoa. Kohteen 1 mittaustietoa on kahdelta mittausjaksolta, joista ensimmäinen on tehty ilmanvaihdon ollessa epätasapainossa ja toinen uudelleen säädön jälkeen tasapainotilanteessa. Kohteen 1 seurantamittausjaksot ovat tyypillisiä paine-erojen seurantamittauksia. Lisäksi mittaustietoa on kohteesta 2 samoja tiloja palvelevan tulo- ja poistoilmanvaihdon toisistaan eroavien aikaohjelmien aiheuttamien poikkeamien selvittämiseksi tehdyistä mittauksista lyhyellä mittausvälillä. Kohteen 2 mittaustulosten avulla vertailtiin mittaustiheyden vaikutusta mittaustuloksiin.

Paine-erojen seurantamittauksissa tulee paljon mittausaineistoa. Tämä on asia, joka vaikuttaa mittausjakson pituuden ja mittaustiheyden valintaan. Tulosten tulkitseminen suoraan mittaustuloksista isosta aineistosta on hankalaa tai lähes mahdotonta yksittäisiä mittaustuloksia tarkastelemalla. Perinteisen kuvaajan ja pysyvyyskäyrien piirtäminen helpottaa ison aineiston tulkintaa. Pysyvyyskäyrien informatiivisuutta vertailtiin Rakennusten mittausohjeen mukaisesti käsiteltyjen tulosten ja suoraan mittalaitteista saatujen tulosten välillä. Myös pysyvyyskäyriä ja perinteisiä kuvaajia vertailtiin toisiinsa.

2 ILMANVAIHTO JA PAINE-ERO

2.1 Ilmanvaihdon tarkoitus

Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät ovat kehittyneet 2000-luvulla voimakkaasti puhtaampien ja energiatehokkaampien ilmanvaihtojärjestelmien suuren kysynnän vuoksi. Yhtenä tekijänä tässä on ollut EU:n rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) käyttöönotto ja sen mukanaan tuomien myös ilmanvaihtoon liittyvien vaatimusten toteuttaminen, jotka vaativat muutoksia uudis- ja korjausrakentamisessa. (Sandberg & Hänninen 2014, 7.) Nykyisin tavoitellaan lähes nollaenergiatasoa rakentamisessa, minkä myötä on luotu erilaisia

ympäristöluokitusjärjestelmiä. Ympäristöluokitusjärjestelmien tarkoitus on vaikuttaa mm. pienempään ympäristöjalanjälkeen ja energiatehokkuuteen, mutta turvata kuitenkin hyvät sisäilmaolosuhteet rakennusten käyttäjille. (Sandberg & Hänninen 2014, 19.) Ilmanvaihdon ja muiden rakennusteknisten ratkaisujen avulla pyritään luomaan sisäympäristöön terveelliset, turvalliset ja viihtyisät olosuhteet (Sandberg & Railio 2014, 21). Koneellisen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmien säätäminen on tiiviissä rakennuksissa tehtävä huolella, jotta vältetään liian suurilta paine-eroilta ulkovaipan yli. Säätytyössä tuleekin käyttää tiiviissä rakennuksissa paine-eromittauksia oikeiden säätöjen saavuttamiseksi kaikilla ilmanvaihdon asetuksilla. (RIL 250-2020 2020, 151.)

2.2 Paine-ero rakennuksissa

Ilmakehän aiheuttama normaali-ilmanpaine on 101325 Pascalia (Pa). Ulkona ilmanpaine vaihtelee sääilmiöiden vaihdellessa, joten käytännössä normaali-ilmanpaine valitsee harvoin (Ilmatieteenlaitos s.a.) Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittauksissa riittää, kun verrataan sisäilmassa valitsevaa ilmanpainetta ulkoilmassa valitsevaan ilmanpaineeseen, joten absoluuttisella ilmanpaineella ei ole merkitystä paine-eromittauksissa. Vallitsevaa ulkoilman ilmanpainetta pidetään paine-eromittauksissa vakiona. (Moisio ym. 2019, 50.)

Rakennuksen vaipparakenteiden läpi kulkevat ilmavirtaukset ovat ongelmallisia tilojen terveellisyyden kannalta. Ilmavirtaukset rakenteiden kautta sisätiloista ulospäin kuljettavat kosteutta lämpimistä sisätiloista rakenteisiin, joissa ilman mukana kulkeutuva vesihöyry kylmemmissä olosuhteissa tiivistyy rakenteiden pinnalle ja otollisissa olosuhteissa saattaa aiheuttaa mikrobikasvua rakenteissa. (Moisio ym. 2019, 49.) Puurunkoiset avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyt rakenteet ja sisäpuolelta avohuokoisilla lämmöneristeillä toteutetut rakenteet ovat riskialtteimpia rakenteita ylipaineen aiheuttamille kosteusvaurioille. Suurin ylipaineen aiheuttama kosteusvaurioriski on yläpohjissa ja ulkoseinien yläosissa. (RIL 250-2020 2020, 151.)

Ulkoa rakenteiden läpi sisätilojen suuntaan kulkeva ilma voi kuljettaa epäpuhtauksia rakenteista sisäilmaan. Alapohjarakenteet ja niiden kautta tulevat ilmavirtaukset ovat sisäilman terveellisyyden kannalta kriittisimmät ilmavuotoreitit.

(Moisio ym. 2019, 49.) Erityisesti ryömintätilaisesta alapohjasta mikrobien kulkeminen sisäilmaan voi olla merkittävää. Suurien ali- ja ylipaineiden välttämiseksi ilmanvaihdon tasapainotus tulee tehdä huolella paine-erot huomioiden kaikkien käyttötilanteiden osalta erikseen, jolloin vältytään myös rakennuksen käyttöaikojen ulkopuolisen ajan osalta liian suurilta yli- ja alipaineilta. (RIL 250-2020 2020, 151.)

Korkeisiin rakennuksiin kannustetaan tehtävän ilmatiiviitä väliseiniä ja välipohjia sekä tilojen osastointeja, jolloin helposti korkeisiin rakennuksiin muodostuvia termisen paine-eron aiheuttamia korkeita paine-eroarvoja saadaan pienennettyä. Ilmanvaihdon säätäminen on vaikeampaa ilmatiiviimmissä rakennuksissa, joten suositeltu ilmanvuotoluvun q_{50} minimiarvo on 0,5–1,0 m³/(m²h). Ilmanvuotoluku kertoo, kuinka monta kuutiota ilmaa kulkee rakenteiden läpi neeliötä kohti tunnissa eli ilmanvuotoluku kertoo rakennuksen tiiveydestä. (RIL 250-2020 2020, 151.) Tiiviissä rakennuksessa ilmanvaihdon pienikin tulo- ja poistoilmavirtojen välinen ero voi aiheuttaa suuren paine-eron, joka voi olla useita kymmeniä pascaleita (Björkroth & Eskola 2019, 20). Tämän ilmiön myötä tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihdon epätasapaino aiheuttaa aikaisempaa enemmän ongelmia, koska pienemmällä ilmamäärän virheellä aiheutetaan tiiviissä rakennuksessa isompia muutoksia painesuhteisiin kuin epätiiviimmissä rakennuksissa. Tämä tarkoittaa, että ilmanvaihdon säätötyö tulee tehdä tarkemmin, kuin mitä on aikaisemmin tehty, jotta saavutetaan ilmanvaihdon tasapaino. (Moisio ym. 2019, 49.)

2.3 Uudet rakennukset

Euroopan Unionin nZEB (nearly Zero Energy Building) direktiivi eli lähes nolla energiarakennus -direktiivi määrää vuoden 2021 alusta alkaen rakentamaan ainoastaan tiiviitä ja energiatehokkaita rakennuksia. Julkiset rakennukset on pitänyt rakentaa jo vuoden 2019 alusta alkaen lähes nolla energiarakennus -direktiivin mukaisesti. Lähes nolla energiarakennuksilla tulee olla erittäin korkea energiatehokkuus ja niiden energiakulutuksen tulee olla lähes olematonta tai erittäin vähäistä. Niissä kulutettavan energian tulee olla hyvin laajalti katettavissa uusiutuvilla energiamuodoilla. (Euroopan Unioni s.a.)

Suomen kansallinen lähes nollaenergiarakentamisen hanke FInZEB määrittelee Suomen kansalliset käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat. Hanke oli käynnissä vuosina 2013–2015, jolloin määritettiin suuntaviivat Suomen olosuhteisiin sopiviksi. (Reinikainen ym. 2015, 5.) Hankkeessa päädyttiin siihen, että valistuksen tulee olla toimintoihin nähden laadullisesti ja määrällisesti riittävä, sisäilman laadun hyvä ja rakennuksen rakenneratkaisujen fysikaalisten ominaisuuksien tulee olla toimivia ja turvallisia. Julkisissa rakennuksissa sisäilman laadun tulee täyttää Sisäilmaluokituksen S2-luokan sisäilmavaatimukset. Rakennuksen vaipan tiiveys tulee olla niin tiivis, ettei vuotokohtien kautta kulkevista ilmavirroista ole haittaa rakenteille tai käyttäjille. Lisäksi vaaditaan julkisissa rakennuksissa D2-ohjeen mukaista minimi-ilmanvaihtoa yöaikana käytettäväksi sekä tarpeen mukaista ilmanvaihtoa energian säästämiseksi mm. toimisto- ja liikerakennuksissa, päiväkodeissa, kouluissa, majoitusliikerakennuksissa ja liikuntahalleissa eli tiloissa, joissa tilojen käyttöaste vaihtelee. (Reinikainen ym. 2015, 34–36.)

2.3.1 Koulurakennusten erityispiirteet

Muihin rakennustyyppeihin verrattuna koulurakennuksien huonetilavuus on henkeä kohti pieni, joten ilmanvaihdon toimivuudella on koulurakennuksissa suuri merkitys. Kouluissa luokkahuoneissa hiilidioksidipitoisuus ja lämpötila nousevat herkästi, mikäli ilmanvaihto tiloissa ei ole riittävä. Koulurakennuksia ei yleensä jäähdytetä koneellisesti, joten kouluissa voi olla käytössä koneellinen yötuuletus tai muita teknisiä ratkaisuja liiallisen lämpenemisen estämiseksi. Erillistä jäähdytystä käytetään lähinnä vain tietokoneluokissa ja serverihuoneissa, joissa lämpökuorma on huomattavan suuri. (Jokinen ym. 2014, 334.)

Koulurakennukset ovat erityisen haastavia, koska niissä on monenlaisia erityisilmanvaihdolla varustettuja tiloja. Tällaisiin erityisiä tiloja ovat mm. liikuntasali, keittiö, veisto- ja kotitalousluokka. Näissä kaikissa on omat ilmanvaihdon erityispiirteensä. Veistoluokassa voi olla puun käsittelypaikoilla kovatehoinen puurunpoistoimuri ja maalaamossa kemikaaleja varten kohdepoisto. Kotitalousluokassa on useita liesiä, joissa voi olla kaikissa omat liesituulettimet. Koulun keittiössäkkin on tämän lisäksi ilmanvaihdon poistoissa tehostimia, joilla saadaan tarpeenmukaista poistoilmanvaihtoa tehostettua. Nämä kaikki edellä

mainitut järjestelmät lisäävät tilojen alipaineisuutta ja tarvitsevat vastaavan määrän tuloilmaa, jotta tilat eivät mene liian alipaineisiksi tilojen käyttöaikoina. Liikuntasalit ovat usein korkeita tiloja ja niissä on suuret ilmatilavuudet, joten niissä on usein erillinen ilmanvaihto.

Kouluissa voi olla käytössä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ratkaisuja, joiden tekninen toteutus on voitu toteuttaa automaattisesti toimivilla, kaksiasentoisilla on/off-tehostuspelleillä tai ilmavirtasäätimillä. Näissä ratkaisuihin ilmanvaihdon tehostus tulee käyttöön huonetilan lämpötilan noustessa liian korkealle tai hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa liikaa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tiloja ovat yleensä opetustilat, juhlasali, aula ja ruokala, joissa tilojen käyttöaste ja sitä kautta kuormitus vaihtelevat suuresti. (Jokinen ym. 2014, 335.)

2.4 Rakennusten paine-erojen mittausohje

Rakennusten paine-erojen mittausohje -projektin loppuraportissa (2019) on esitetty ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan vaikutuksia rakennusten painesuhteisiin. Ohjeen mukaiset mittaukset on tarkoitettu tehtäväksi ilmanvaihdon säätötyön yhteydessä määrittämään uudelleen säädön tarvetta, ilmanvaihtoautomaation toiminnan parantamisen kautta paine-erojen vaihtelujen pienentämiseen ja sisäilmakorjauksiin liittyviin mittauksiin. Ilmanvaihdon tasapainon tarkistamisessa uusissa ja tiiviimmissä rakennuksissa on paine-eromittausten merkittävyys kasvanut, koska tiiviissä rakennuksessa pienikin ilmamäärämuutos vaikuttaa voimakkaasti painesuhteisiin. Nykyisin on suositeltavaa käyttää paine-eromittauksia säätötyön apuna, jolloin saadaan tarkempaa tietoa säädön vaikutuksista kuin mitä on mahdollista saada ilmavirtausmittausten avulla (Björkroth & Eskola 2019, 12). Mittausohjeessa on korostettu termisen paine-eron huomioimista erityisesti kylmänä vuodenaikana, jolloin sen vaikutus on suurimmillaan. Termisen paine-eron vaikutuksesta ilma pyrkii virtaamaan rakennuksen yläosista ulos ja alaosista sisään. (Björkroth & Eskola 2019, 9.) Paine-erojen mittausohjeessa on hypoteesi, että tarvitaan 1–2 viikon mittausjakso, jotta nähdään toiminnan ja viikonlopun aikaisien mittaus tulosten vaihte- luita (Björkroth & Eskola 2019, 29).

2.5 Paine-eromittaukset

Paine-eromittalaitteeseen kuuluu mittarin lisäksi muoviletku, jonka päässä on pneumatiikka- tai kupariputki. Putki asennetaan yleensä tuuletusikkunan tai oven alanurkkaan ja ikkuna tai ovi suljetaan, jolloin tulee varoa putken painumista kasaan. Sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa suositellaan mitattavan seurantamittauksena, jolloin ilmanvaihdon käyntiaikojen aiheuttamat muutokset paine-eroissa havaitaan. Hetkellisenä mittauksena voidaan mitata huonetilojen välisiä painesuhteita, jotka yleensä vaihtelevat vähemmän kuin ulkoilmaan nähden tehdyt mittaukset. (Björkroth & Eskola 2019, 24–25.)

Markkinoilla on kalvoanturi- ja virtausanturitekniikoihin perustuvia mittalaitteita, joilla voidaan mitata huonetilojen ja ulkoilman välistä sekä kahden huonetilan välistä paine-eroa. Virtausanturin toiminta perustuu kuumalankatekniikkaan. Virtausanturilla mittauksia tehdessä tulee huomioida, että käytetään oikean sisähalkaisijan pneumatiikkaputkea, koska putken sisähalkaisijalla on vaikutusta mittaustuloksiin. (Björkroth 2021.) Kalvoanturin toiminta perustuu piilevyn taipumaan ja siitä saatavaan sähkösignaaliin (Kippo & Tikka 2008, 60).

Paine-erojen mittausohjeen (2019) mukaan mittalaitteiden mittausalue tulee olla vähintään $-50...+50$ Pa, mittausvirhe saa olla mittausalueella $-10...+10$ Pa enintään 1 Pa ja resoluutio eli lukematarkkuus tulee olla vähintään 1 Pa, mutta mielellään 0,1 Pa. Nämä vaatimukset koskevat hetkellisiä mittauksia sekä seurantamittauksia. Lisäksi seurantamittauslaitteiden tulee voida mitata vähintään viikon mittausjakson ja laitteen tulee pystyä mittaamaan minuutin välein, joten mittalaitteen muistiin tulee mahtua vähintään 10 000 mittaustulosta. (Björkroth & Eskola 2019, 29.)

2.5.1 Hetkelliset mittaukset

Hetkelliset paine-eromittaukset sopivat parhaiten kahden huonetilan välisiin mittauksiin. Esimerkiksi tuulella ei ole juurikaan vaikutusta kahden sisätilan välisiin mittaustuloksiin toisin kuin sisä- ja ulkoilman välisissä mittauksissa. Yksittäisen huonetilan paine-eron hetkellisen mittauksen avulla voidaan selvittää kyseisen huonetilan ilmanvaihdon tasapainotilanne. Jos hetkellisellä mittauksella halutaan selvittää ilmanvaihdon aiheuttamaa sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa, tulee mittaajan selvittää kyseisen kohteen ilmanvaihtoratkaisu ja

mistä käyttötilanteesta halutaan mittaustietoa. Ilmanvaihto voi olla kello-ohjattu, jolloin ilmanvaihto voi olla täysiteholla, puoliteholla tai kokonaan pois päältä. (Björkroth & Eskola 2019, 23–25.)

2.5.2 Seurantamittaukset

Paine-erojen seurantamittauksen pituuden suositellaan olevan 1–2 viikkoa ja mittausjaksoon tulee sisältyä ainakin yksi viikonloppu, jolloin nähdään ilmanvaihdon toimivuus erilaisissa rakennuksen käyttötilanteissa. Viikonlopun aikaisella mittauksella nähdään rakennuksen käyttöajan ulkopuolinen tilanne mm. koulu- ja toimistorakennuksissa. Seurantamittauksen avulla pystytään selvittämään keskimääräinen paine-ero, sään ja rakennuksen käytön vaikutus paineeroon, ilmanvaihdon säätöautomaation toiminta ja ilmanvaihtokoneiden käyntiajat niissä tilanteissa, kun ilmanvaihto ei ole tasapainossa. (Björkroth & Eskola 2019, 29.)

Seurantamittauksista odottamattomia virheitä mittaustuloksiin voi aiheuttaa se, ettei mittausten tekijä ole tietoinen kaikista kohteessa tapahtuvista muutoksista mittausten aikana. Esimerkiksi mittausten aikana saatetaan ilmanvaihtolaitteita ohjata eri tavalla, kuin mittauksen aloituksen ja lopetuksen aikana on laitteiden ohjaus ollut. Myös väliovien asento vaikuttaa mittaustuloksiin. (Björkroth & Eskola 2019, 29.)

2.6 Paine-eromittaustuloksiin vaikuttavat tekijät

Rakennuksiin muodostuu häiriöiksi luokiteltavaa ilman liikettä sääolosuhteiden ja tilojen käytön vaikutuksesta. Nämä häiriöt tulisi mahdollisuuksien mukaan suodattaa pois paine-eromittaustuloksista. (Björkroth & Eskola 2019, 3.)

Paine-erojen suuruuteen vaikuttavat myös rakennuksen aukkojen sijainnit ja valitseva tuulen suunta (RIL 250-2020 2020,149).

2.6.1 Ilmanvaihtojärjestelmien vaikutus paineeroon

On tärkeää hyvän sisäilman kannalta, että ilmanvaihto on säädetty ja tarkistusmitattu suunnitelmien mukaisille ilmamäärille. Ilmanvaihdon tasapainotuksella varmistetaan, että yksittäisten huonetilojen väliset painesuhteet pysyvät

hallinnassa ja että ilmavirrat kulkevat suunnitelmien mukaisesti. Hyvällä ilmanvaihdon tasapainotuksella saavutetaan rakennuksen kaikkiin osiin tasainen ilmavirtaus ja saadaan minimoitua korvausilman virtaaminen hallitsemattomien reittien kautta sisäilmaan. (RIL 250-2020 2020,196.) Tulo- ja poistoilmanvaihdon säätötöiden yhteydessä on tärkeää tarkistaa myös mittauksilla syntyvien paine-erojen suuruus vaipan yli kaikilla ilmanvaihdon asetuksilla. Ilmanvaihdon käyttöasetuksia voi olla illan, yön ja viikonlopun käyttöasennot. Tarkistuksen tarkoitus on varmistaa esimerkiksi se, etteivät tilat pääse liian alipaineiseksi tilanteessa, jossa pääilmanvaihto on pois päältä ja likaisten tilojen poistot ovat jatkuvasti päällä. (RIL 250-2020 2020,151.)

2.6.2 Terminen paine-ero

Teromisella paine-erolla tarkoitetaan ilman lämpötilan vaikutusta paine-eroon. Terminen paine-ero on suurimmillaan silloin, kun sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on suurimmillaan. Suomen ilmasto-olosuhteissa se tarkoittaa sitä, että terminen paine-ero on suurimmillaan talven pakkasilla. Silloin kylmä ilma pyrkii rakennuksen alaosaan sisälle ja yläosaan lämmennyt ilma ulospäin. Mitä voimakkaampi on tämä ilmiö, niin sitä suuremmat ovat vaikutukset paine-erojen mittaustuloksiin eri korkeuksilta mitattuna. Tästä johtuen suositellaan termisen paine-eron kompensointia normaalin mittauskorkeuden tasoon eli referenssitason, joka on määritetty yhteen metriin. Rakennusten paine-erojen mittaushjeessa opastetaan korjaamaan tulokset termisellä paine-erolla, jos mittauspisteen korkeus on muu kuin 0,0–2,0 metriä sekä sisä- ja ulkoilmanlämpötilan erotus on yli 5 °C. Mittauskorkeuden ollessa välillä 0,0–2,0 metriä tulee terminen paine-ero korjata silloin, kun sisä- ja ulkoilmanlämpötilan erotus on yli 10 °C. Mittaustulokset voidaan joutua korjaamaan termisellä paine-erolla myös vain 0,3 metriä referenssitasosta poikkeavien mittauspisteiden osalta, kun sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on suuri. (Björkroth & Eskola 2019, 27.)

Termisen paine-eron laskennassa lasketaan ulkoilman ja sisäilman tiheyksien erotus, joka kerrotaan painovoiman kiihtyvyydellä. Tulokseksi saadaan terminen paine-ero, jonka yksikkö on Pa/m. Termisen paine-eron suuruus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä suurempi on ulko- ja sisälämpötilojen ero. Kesällä, jolloin ulkolämpötila on lähellä huonelämpötilaa, termisen paine-eron vaikutus

mittaustuloksiin on pienempää kuin talviaikaan tehdyillä mittauksilla. (Björkroth & Eskola 2019, 9, 27–29.)

Lämpötilaolosuhteet ovat harvoin paikan ja ajan suhteen tasaisia edes sisätiloissa. Ajallista vaihtelua sisätiloissa aiheuttaa jäähdytyksen ja lämmityksen ohjaustavat sekä säätöjärjestelmän reagointi olosuhteiden muutoksiin. Erilaiset jäähdytys- ja lämmitystavat tuottavat erilaisia lämpötilaprofiileja huonetiloihin. Lisäksi ajallista vaihtelua sisätiloissa aiheuttaa myös sisäisten kuormien vaihtelu ja sää. Ikkunat vaikuttavat merkittävästi pintojen ja sisäilman lämpötiloihin auringon säteilyvaikutuksen vuoksi. Pystysuuntaisia lämpötilaeroja voi syntyä huonetiloihin erityisesti säteilyjäähdytyksen tai syrjäyttävän ilmanjaon vaikutuksesta. (Säteri & Koskela 2014, 51.) Sisäilmaan vaikuttaa myös lämpösäteily huonetilan sisäisistä lähteistä, kuten elektronisista laitteista johtuvasta lämpösäteilystä ja huonepintojen välillä sekä johtumalla seinien ja muiden rakenteiden läpi. Lämpöä varastoituu kalusteisiin ja rakenteisiin. (Sandberg & Koskela 2014, 104.) Tyypillisiä, ulkoisia sisäilman lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä ovat auringon vaikutus ja ulkoilman lämpötilat, jos ilmanvaihtolaitteiston jäähdytysteho ei riitä. Toimistotiloissakin lämpötilat voivat vaihdella ajankohdan, viikonpäivän, vuodenajan ja tilojen käyttöasteen vaikutuksesta. (Säteri & Koskela 2014, 75.)

Mitoitusulkoilman määrittelyn avulla Suomi on jaettu neljään ilmastovyöhykkeeseen. Mitoitusulkoilmaa käytetään rakennesuunnittelussa kyseiselle ilmastoaalueelle soveltuvien rakenneratkaisujen suunnittelemisessa. Talven mitoitusulkoilma eri vyöhykkeille on määritetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5. Talven ulkolämpötilavyöhyke I on Etelä-Suomi ja IV on Pohjois-Suomi. Lämpötilan mitoitusarvot vaihtelevat välillä $-26\dots-38$ °C, jonka mukaan Pohjois-Suomessa on talvella noin 12 °C kylmempää kuin Etelä-Suomessa. (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2013.) Tämän pohjalta voidaan olettaa, että maan pohjoisosissa termisen paine-eron kompensoinnin tärkeys korostuu voimakkaammin kuin muualla Suomessa.

2.6.3 Tuulen vaikutus

Tuulen vaikutus mittaustuloksiin voi näkyä eri julkisivuilla tehdyissä mittauksissa niin, että tuulen puolella havaitaan alipainetta ja tuulensuojan puoleisella julkisivulla havaitaan ylipainetta. Graafisissa kuvaajissa tämä ilmiö voi näkyä siinä, että mittauspisteiden mittaustulokset esiintyvät peilikuvina toisiinsa nähden. Tämä ilmiö syntyy, kun tuuli osuu kohtisuoraan mitattavaan julkisivuun, joten tuuli ei aiheuta vastaavaa ilmiötä tuulen myötäisillä sivuilla oleviin mittauksiin. (RIL 250-2020 2020, 150.)

Tuulen mittaukseen on kehitetty mittalaitteita, mutta rakennusten julkisivuihin vaikuttava tuuli on ongelmallinen mitattava, koska tuuli vaikuttaa vain osaan kokonaisjulkisivupinnasta kerrallaan ja muu alue on tuulen suojan puolella. Myös rakennuksen korkeudella on vaikutusta sen julkisivuihin vaikuttavan tuulen voimakkuuteen, jolloin rakennuksen ylimmissä osissa voi olla suuremmat tuulen vaikutukset kuin alemmissä kerroksissa. Mitta-antureiden ongelmana on, ettei tuulta voida sivutuulesta luotettavasti mitata. (Clinchard ym. 2020, 215–216.) Käytännössä paine-eromittauksissa voidaan käyttää mittausetkun päässä tuulisuojaa tai vesityksellä varustettua suojarasiaa tuulen aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi (Björkroth & Eskola 2019, 29).

2.7 Paine-erojen laskenta ja tulosten esitys tavat

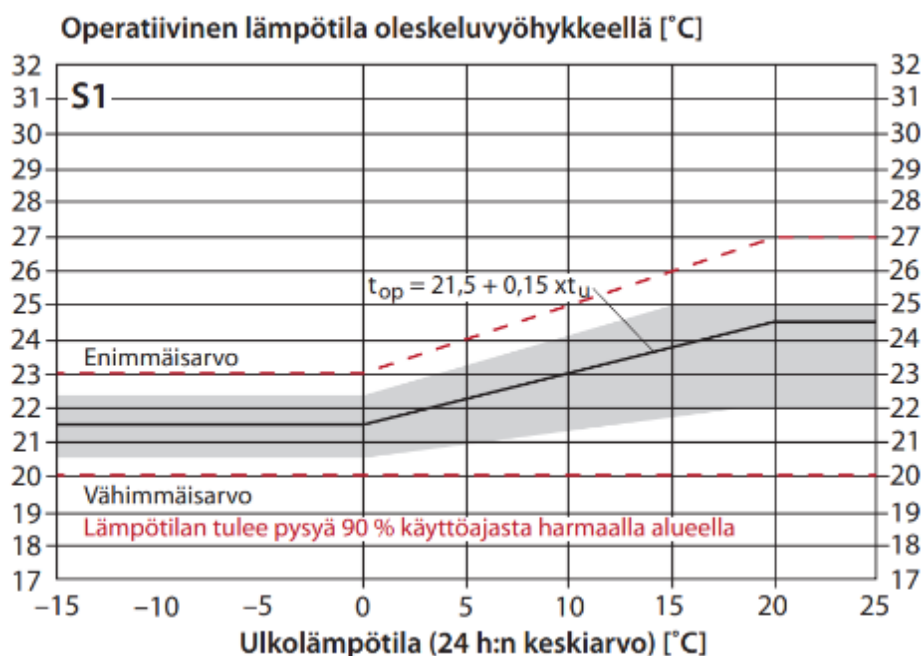
Paine-erojen mittaustuloksia esitetään usein suoraan mittalaitteesta saatuina tuloksina. Paine-eromittauksissa esiintyy kuitenkin virheitä, jotka saattavat johtaa vääriin johtopäätöksiin. Laskennallisesti voidaan määrittää ilman lämpötilasta, tuulesta ja rakennuksen ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero (Moisio ym. 2019, 50).

Seurantamittausten tuloksia voidaan esittää myös pysyvyyssäyriä avulla, jolloin mittaustuloksista lasketaan pysyvyyss prosentit. Pysyvyyss prosentit ilmaisevat sen, kuinka suuren osan ajasta tarkasteltava suure pysyy milläkin alueella. (Säteri & Koskela 2014, 75.)

Lämpötilamittaustulosten esittämisessä on käytetty pysyvyyssäyriä. Lämpötilojen pysyvyyssäyrissä on havaittu ongelmaksi se, että sen avulla ei voida havaita poikkeamien suuruutta. Lämpötilalaskennassa tähän ongelmaan on

otettu ratkaisuksi käyttöön poikkeamien tunnittaisen summan laskentamene-
telmä, jossa asetetut raja-arvot ylittävät lukemat lasketaan yhteen ja ilmoite-
taan muodossa °Ch. Tässä laskentatavassa on siis ylitysmäärä ilmoitettu yli-
tysten summana tuntia kohti. (Säteri & Koskela 2012, 55.)

Lämpötilan tuntisummalle on annettu raja-arvot rakentamismääräyskokoelman
osioissa D3-2012 energialaskentaa varten (Suomen rakentamismääräysko-
koelma D3 2011). Sisäilmaluokitus 2018 määrittelee lämpötilalle raja-arvot
lämpötilojen pysyvyydelle prosentteina käyttöajasta. Toimi- ja opetustilojen
lämpötilan tulee pysyä 90 % ajasta kuvassa 1 esitetyllä alueella.



Kuva 1. Sisäilmastoluokitus 2018 mukaiset raja-arvot lämpötiloille (Sisäilmastoluokitus 2018, 6).

Kuvassa 1 esitetään sisäilman raja-arvot eri ulkoilman lämpötiloilla. Sisäilmas-
toluokitus 2018 ei ohjeista pysyvyysskäyrien käyttöön (RT 07-11299, 2018, 6.)
Sisä- ja ulkoilman välisille paine-eroille ei ole olemassa vastaavia laskentata-
poja eikä raja-arvoja Suomen rakentamismääräyskokoelman teoksessa, joka
koskee ilmanvaihtoa ja sisäilmaa (D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma
2011).

3 TUTKIMUSAINEISTO JA -MENETELMÄT

Paine-eromittauksia tehtiin lähes 20 koulukohteessa, joista valittiin kaksi parhaiten tähän työhön soveltuvaa kohdetta Rakennusten paine-erojen mittausohjeen mukaisten menetelmien koekäyttöön. Kaikki mittaukset on tehty Rakennusten paine-erojen mittausohjeen mukaisesti (Björkroth & Eskola 2019). Mittausten myötä esiin tuleviin ongelmallisiin kohtiin haluttiin kiinnittää huomiota, jotta jatkossa mittauksilla saataisiin mahdollisimman totuudenmukaisia tuloksia. Erityisesti mittausolosuhteisiin kiinnitettiin huomiota ja siihen minkälaisissa olosuhteissa niiden vaikutus on merkittävä.

3.1 Mittauskohteet

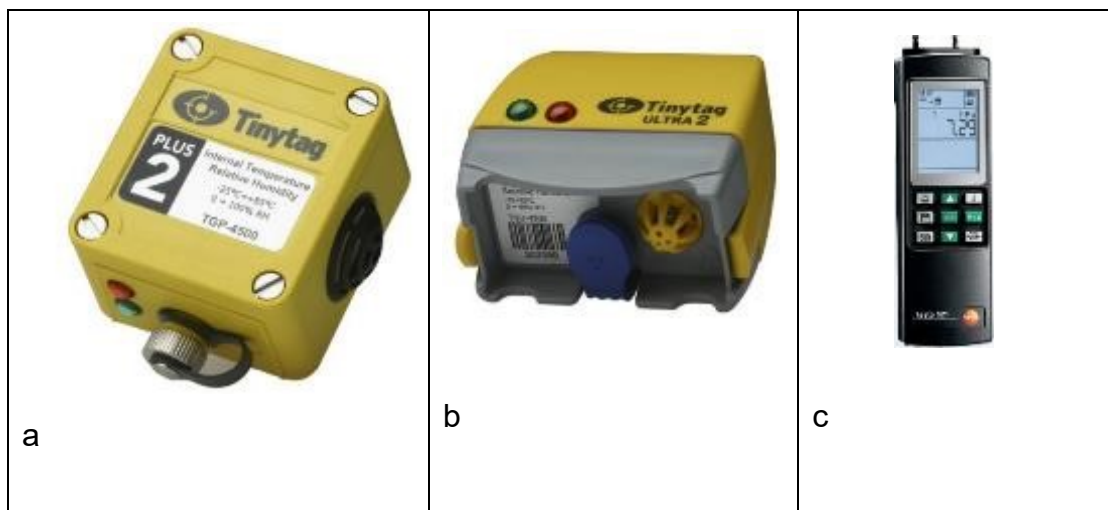
Kohde 1:ksi valittiin vuonna 2007 valmistunut koulurakennus, jossa on käytössä lämmöntalteenotolla varustettu tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Koulurakennuksessa on kaksi kellarikerrosta ja kolme maanpinnan yläpuolista kerrosta. Tämän kohteen mittautustietoja käytettiin laajasti tässä tutkimuksessa.

Kohde 2 on vuonna 2014 valmistunut kaksi kerroksinen koulurakennus, jossa on käytössä lämmöntalteenotolla varustettu tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä. Tämän kohteen mittautustietoja käytettiin mittautustiheyden tarkastelussa tässä tutkimuksessa.

3.2 Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet

Paine-eromittaukset kohteissa tehtiin Testo 521 -mittalaitteilla ja lämpötilamittaukset sisätiloissa Gemini TGU-4500 Tinytag Ultra 2 dataloggereilla ja rakennusten ulkopuolella Gemini TGP-4500 Tinytag Plus 2 dataloggereilla. Tutkimuksissa käytetyt mittalaitemallit on esitetty kuvassa 2.

Paine-eromittalaitteiden mittausalue on $-250...+250$ pascalia (Pa) ja mittaus-tarkkuus on $0,1$ pascalia (Humitec Oy 2014, 4). Sisätiloissa ja ulkoilmamittauksissa käytettävien lämpötilaloggereiden mittausalue on $-25...+85$ °C ja mittaus-tarkkuus $0,01$ °C tai parempi. (Gemini Data Loggers (UK) Ltd. 2019a, 2; Gemini Data Loggers (UK) Ltd. 2019b, 2.)



Kuva 2. Tutkimuksessa käytettyjen mittalaitteiden mallit (Gemini Data Loggers (UK) Ltd 2019a, 1; Gemini Data Loggers (UK) Ltd 2019b, 1; Humitec Oy 2014, 1)

Kuvassa 2 ovat tutkimuksissa käytetyt ulkoilman (a) ja sisäilman (b) lämpötila-loggerimallit sekä paine-erologgerimalli (c).

3.3 Mittauskohteista saatu aineisto

Tutkimuksessa on käytetty koulukohteista saatua mittausdataa, jolloin tuloksissa on kaikki satunnaiset mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät mukana. Koulurakennuksessa 1 tehtiin paine-eromittauksia 1.-19.11.2019 ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus- ja säätötyön jälkeisessä tilanteessa, jolloin haluttiin varmistaa säätötöiden onnistuminen. Tutkimuksessa on mukana myös tutkimustietoa samasta kohteesta uudelleen säädön jälkeisestä tilanteesta 8.-22.5.2020. Mittaukset tehtiin 14 ja 19 vuorokauden seurantamittauksina käyttäen yhden minuutin mittausväliä. Jokaisen mittauspisteen mittauskorkeus mitattiin rullamittan avulla mittalaitteiden asennuksen yhteydessä. Molemmilla mittauskerroilla seurantamittauksia oli yhdeksässä mittauspisteestä. Mittaukset ulotettiin kaikkien ilmanvaihtokoneiden palvelualueille ja kaikille julkisivuille. Seurantamittauksen lisäksi tehtiin täydentäviä mittauksia hetkellisen paine-eron mittauksilla rakennuksen sisätilojen välisten paine-erojen selvittämiseksi.

Kohteessa 2 paine-eromittaukset tehtiin tiheällä 15 sekunnin mittausvälillä, joten siitä saatiin sopiva aineisto tämän työn mittaustiheyden tarkasteluun. Mittaus tehtiin alle vuorokauden pituisena seurantamittauksena 27.–28.1.2020.

3.3.1 Mittausjakson pituus

Sopivan mittausjakson pituuden arvioinnissa on mittalaitteiden tallennuskapasiteetin aiheuttamat rajoitteet sekä ilmanvaihtojärjestelmien aikaohjelmien ja rakennuksen käytön vaihteluiden aiheuttamat mittaustarpeet huomioitu. Tutkimuskohteen 1 tuloksia arvioidaan näiden mittausjakson pituuteen vaikuttavien tekijöiden pohjalta.

Varsinaisen mittausjakson pituuden arvioinnissa on samasta mittausaineistosta tehty eri pituisia jaksoja, joiden keski-, mediaani-, minimi- ja maksimiarvoja on vertailtu kahden viikon mittausjakson tuloksiin pascaleina ja prosentuaalisina eroina. Pascaleina esitetyistä tuloksista nähdään todellinen ero tulosten välillä ja prosentteina esitettynä tuloksien välinen ero nähdään suhteellisena. Myös näiden kahden vertailumenetelmän käytettävyyttä arvioitiin. Vertailut mittausjakson pituudet olivat 7, 5, 3 ja 1 päivää. Kaikista mittausjakso-pituuksista oli vähintään kahdelta eri ajanjaksolta vertailtu tuloksia kahden viikon tuloksiin, jotta nähtiin sattuman vaikutus mittausjakson ajankohtana. Vertailtaessa kahden viikon mittausjaksoja ja lyhyempiä mittausjaksoja toisiinsa suurina eroina pidettiin yli 10 pascalin ja yli 10 prosentin eroja kahden viikon vertailutuloksen arvoon verrattuna ja huomioitavina eroina pidettiin 5–10 pascalin ja 5–10 prosentin eroja. Mittausjakson arvioinnissa mukana olivat molemmat kohteessa vallinneet tilanteet, jolloin nähtiin vaikutukset voimakkaasti alipaineisessa tilanteessa ja ilmanvaihdon tasapainotilanteessa.

3.3.2 Mittaustiheys

Mittausjakson mittaustiheyden arvioinnissa käytettiin mittauskohteen 2 mitaustuloksia. Mittauskohteessa 2 mittausväli oli 15 sekuntia, koska aikaisemmissa yhden minuutin välein tehdyissä mittauksissa havaittiin aikaohjelmiin viittaavia alipainepiikkejä. Mittausjakson pituus näin tiheällä mittausjaksolla oli vajaa yksi vuorokausi. Mittaustiheyden arvioinnissa on käytetty tätä poikkeamapiikkien selvityksessä käytettyä tiheää mittausväliä. Alkuperäisestä mittausaineistosta on poimittu mitaustuloksia vertailua varten alkuperäisten mitaustulosten lisäksi kolmenkymmenen sekunnin, yhden ja kolmen minuutin välein, jolloin voidaan nähdä jääkö alipainepiikkejä näkemättä harvemmalla mittausvälillä.

3.3.3 Termisellä paine-erolla kompensoidut mittaustulokset

Mittausjakson jälkeen tiedot purettiin mittalaitteista tietokoneella käsiteltäviksi Excel-tiedostossa. Termisen paine-eron kompensoinnissa laskettiin ensin ilman tiheys ulkoilmassa ja sisäilmassa. Laskennassa käytettiin kohteessa seurantamittauksena, paine-eromittauksen kanssa samaan aikaan, tehtyjen lämpötilamittausten tietoja. Sisä- ja ulkolämpötilamittaustulokset kohdistettiin minuutilleen kohdakkain ja laskettiin ulko- ja sisäilman tiheydet jokaiselle mittaustulokselle erikseen kaavan 1 mukaisella laskutoimituksella.

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

jossa	ρ	ilman tiheys	[kg/m ³]
	p	ilmanpaine	[Pa]
	M	ilman moolimassa	[29 kg/kmol]
	R_u	yleinen kaasuvakio	[8315 J/(kmol·K)]
	T	absoluuttinen lämpötila	[K]

Sisä- ja ulkoilman tiheyksien laskennan jälkeen laskettiin terminen paine-ero painovoiman kiihtyvyyden ja ilman tiheyksien erotuksen avulla kaavan 2 mukaisella laskutoimituksella.

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

jossa	$\frac{\Delta p}{\Delta h}$	terminen paine-ero	[Pa/m]
	ρ_u	ulkoilman tiheys	[kg/m ³]
	ρ_s	sisäilman tiheys	[kg/m ³]
	g	painovoiman kiihtyvyys	[9,81 m/s ²]

Laskutoimituksesta saadaan tulokseksi terminen paine-ero muodossa Pa/m. Tämä tulos kerrotaan vielä todellisen mittaustuloksen ja yhden metrin referenssikorkeuden erotuksena saatuun mittaustulokseen, jolloin tulokseksi saadaan termisellä paine-erolla korjattu mittaustulos yhden metrin referenssikorkeuteen laskettuna. Laskutoimitus on esitetty kaavassa 3.

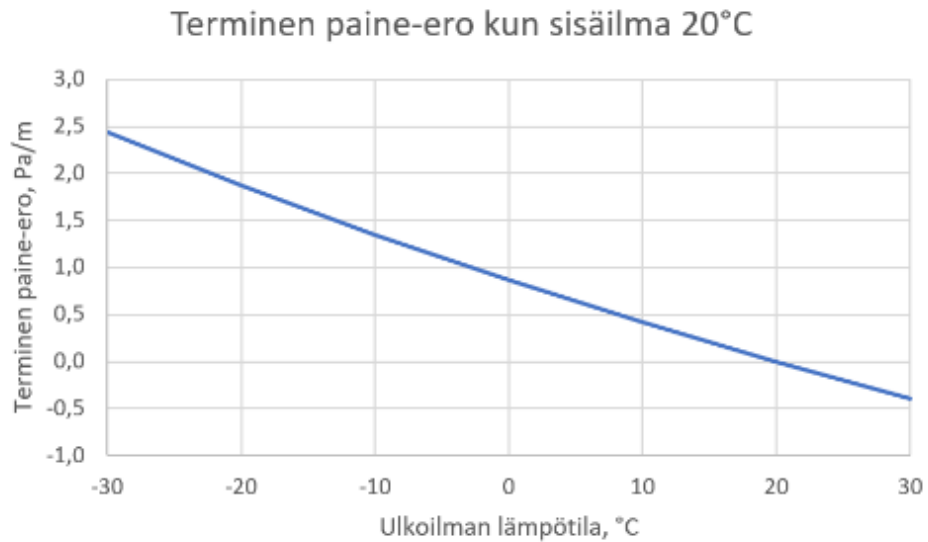
$$\Delta p_{korjattu} = \Delta p_{mitattu} - \frac{\Delta p}{\Delta h} \cdot (h_1 - h_0) \quad (3)$$

jossa

$\Delta p_{korjattu}$	laskennallinen paine-ero 1 m korkeudella lattiasta	[Pa]
$\Delta p_{mitattu}$	mitattu paine-ero	[Pa]
$\frac{\Delta p}{\Delta h}$	terminen paine-ero	[Pa/m]
h_1	mittauskorkeus	[m]
h_0	paine-eron referenssitason korkeus	[m]

Mittauskorkeus normalisoitiin Rakennusten paine-erojen mittausohjeen määrittämälle referenssitasolle, joka on yhden metrin korkeus mittauspisteen kerroksen lattiapinnan korkeudesta. Esimerkiksi jos mittaus tehtiin 1,8 metrin korkeudelta, niin mittauskorkeuden normalisoinnin jälkeen laskennassa käytävä mittauskorkeus on +0,8 metriä. Jos mittauskorkeus on alle metrin korkeudessa, niin normalisoitu mittauskorkeus on miinusmerkkinen.

Kuvassa 3 on esimerkkilaskelmana esitetty termisen paine-eron suuruus, kun sisäilman lämpötila on +20°C. Termisen paine-eron suuruus määräytyy ulkoilman ja sisäilman välisestä lämpötilaerosta, joten kuvassa esitetyjä arvoja ei voida suoraan käyttää termisen paine-eron kompensoinnissa. Terminen paine-ero tulee laskea jokaista yksittäistä mittaustulosta kohti erikseen siten, että huomioidaan mittaushetken aikana olevat ulko- ja sisäilman lämpötilat.



Kuva 3. Termisen paine-eron ulkoilman eri lämpötiloissa, kun sisäilman lämpötila 20°C.

Termisellä paine-erolla kompensoituja tuloksia voidaan laskea myös korkeiden tilojen eri korkeuksille, jolloin mitatun kerroksen lattiapinnasta yhden metrin korkeudella on taso, johon verrataan. Mittauskorkeudeksi laitetaan se korkeus, jolta laskennallinen paine-erotulos halutaan.

Korkeissa tiloissa, kuten liikuntasaleissa joudutaan joissakin tilanteissa asentamaan paine-eromittaus useamman metrin korkeuteen. Tällaisessa tapauksessa tulee tehdä termisen paine-eron korjaus mittaustuloksiin, koska termisen paine-eron vaikutus on jo useamman metrin matkalta. Kuvassa 4 näkyvässä liikuntasalissa ainoa mahdollinen mittauspiste on lähellä kattoa sijaitsevat ikkunat.



Kuva 4. Liikuntasali voi olla esimerkiksi sellainen tila, jossa mittaus metrin korkeudesta on mahdotonta ja ulkoilman lämpötilaolosuhteiden takia tulosten termisen paine-eron kompensointi tulee tarpeelliseksi.

3.4 Tulosten esitystavat

Tämän tutkimuksen kohde 1:n mittausjaksot olivat 1.–19.11.2019 ja 8.–22.5.2020. Ensimmäisen mittausjakson aikana mittausvuorokausia oli 19 ja toisen mittausjakson aikana 14. Mittausväli oli yksi minuutti paine-ero- ja lämpötilamittauksissa, joten yhden vuorokauden aikana yhdestä mittauspisteestä tuli mittaustuloksia 1 440 kpl ja kaikista paine-eromittauspisteistä yhden vuorokauden aikana 12 960 mittaustulosta. Marraskuun 2019 mittauksessa jokaisesta mittapisteestä tuli mittaustulosta 26 000 kpl. Marraskuun mittauksesta tuli kaikista mittauspisteistä laskettuna yhteensä lähes 231 000 paine-eromittauksista ja 40 000 lämpötilamittauksista. Toukokuun 2020 mittauksessa jokaisesta mittapisteestä tuli mittaustulosta lähes 20 000 kpl ja kaikista mittauspisteistä laskettuna yhteensä 180 000 paine-eromittauksista ja yli 50 000 lämpötilamittauksista. Tämän tutkimuksen aineisto käsittää lähes 500 000 yksittäistä mittaustulosta. Mittauksissa olevia virheitä, jotka aiheutuvat mm. ilmanvaihtojärjestelmän häiriöistä, tuulen vaikutuksesta ja rakennuksen käytön aikaisesta toiminnasta, on mahdotonta havaita yksittäisiä mittaustuloksia tarkastelemalla.

3.4.1 Numeerinen laskenta

Numeerisina perusmenetelminä käytettiin keskiarvon, mediaanin, minimin ja maksimin laskentaa. Nämä arvot laskettiin jokaisesta mittauspisteestä erikseen koko mittausjakson ajalta. Tarkastelu perustui saatujen tulosten käytännön merkityksen arviointiin.

3.4.2 Perinteinen kuvaaja

Mittaustulosten hahmottamiseksi yleensä piirretään perinteinen kuvaaja mittaustuloksista, koska se auttaa hahmottamaan mittausjaksoa kokonaisuutena. Myös joistakin mittalaitteista saadaan graafinen kuvaaja suoraan valmiina kuvana.

Perinteinen kuvaaja piirrettiin suoraan mittalaitteista saadusta mittaustulosta ja termisellä paine-erolla korjatusta mittaustulosta. Perinteisen kuvaajan X-akselille laitettiin aika ja Y-akselille paine-erojen mittaustulokset pascaleina.

Näiden kuvaajien mittaustulosten käsittelyn laskumenetelmät on esitelty kappaleessa 3.3.3.

3.4.3 Liukuva keskiarvo

Lisäksi tarkasteltiin perinteisten kuvaajien liukuvan keskiarvon tuloksia 10 minuutin keskiarvoina. Tarkoituksena oli saada mittaustuloksista erilaisia asioita esille liukuvan keskiarvon avulla. Liukuvassa keskiarvossa lasketaan edellä mainittu tai jokin muu määrä mittaustuloksia keskiarvoksi jokaisen mittaustuloksen kohdalle erikseen. Jokaisen siirtymän kohdalla lähtee yksi mittaustulos pois ja yksi tulee tilalle.

3.4.4 Pysyvyyskäyrä

Pysyvyyskäyräkuvaaja piirrettiin suoraan mittalaitteista saadusta mittausaineistosta ja termisellä paine-erolla korjatusta mittausaineistosta. Pysyvyyskäyräkuvaajaan X-akselille laitettiin paine-ero pascaleina ja Y-akselille aika prosentteina. Näiden kuvaajien mittaustulosten käsittelyn laskumenetelmät on esitelty kappaleessa 3.3.3.

4 TUTKIMUSTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimustulosten vertailusta saatiin hyvä käsitys siitä, miten hyvin Paine-erojen mittausohjeen mukaiset menetelmät sopivat käytännön kohteissa tehtyihin mittauksiin ja niistä saatuihin mittaustuloksiin.

4.1 Mittausjakson pituuden tarkastelu

Mittausjaksojen pituuden vertailu on esitetty liitteessä 1. Liitteen kaksi ensimmäistä sivua koskevat kohteen 1 marraskuun 2019 mittauksia ja kaksi viimeistä sivua toukokuun 2020 mittausjaksoa. Samasta mittausaineistosta eri mittausjaksoina lasketut keskiarvot, mediaanit, minimi ja maksimit kertovat hyvin, miten mittausjakson ajoitus vaikuttaa tuloksiin.

Parittomilla sivuilla nähdään tulokset pascaleina. Keltaiseksi on merkitty tulokset, jotka poikkeavat kahden viikon mittausjaksoon verrattuna enemmän kuin 10 pascalia ja vaalean keltaisella ne tulokset, jotka poikkeavat 5–10 pascalia

kahden viikon tuloksesta. Keskiarvo- ja mediaanituloksissa nähdään vain muutama poikkeama kahden viikon vertailujaksoon verrattuna.

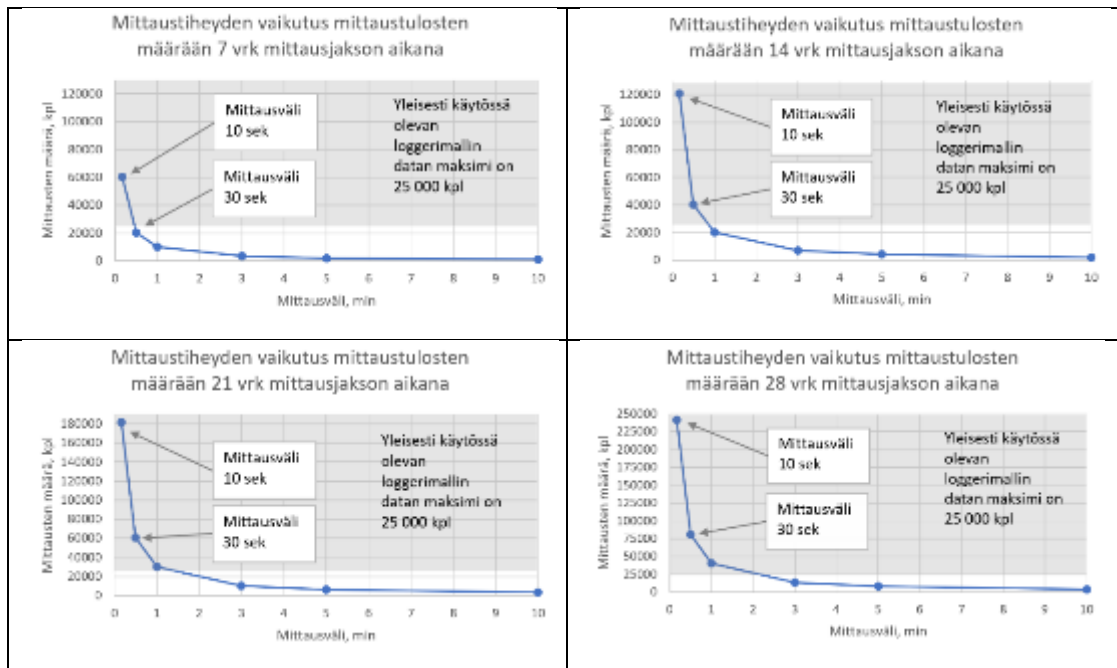
Parillisilla sivuilla on samat tulokset, mutta tulokset on esitetty poikkeamapro-sentteina. Kuvassa tumma väri kuvastaa yli 10 % eroa kahden viikon vertailu-jakson arvoon ja vaalea väri 5–10 % eroa kahden viikon vertailujakson ar-voon. Prosentuaalisen poikkeaman arviointi soveltuu paremmin isoille paine-erolle, jolloin pienet erot eivät korostu liikaa.

Ilmanvaihdon ollessa tasapainossa toukokuun 2020 mittausjakson aikana huomataan keskiarvon ja mediaanin pysyvän kaikilla mittausjaksoilla lähellä kahden viikon vertailuarvoa. Kun ilmanvaihto on tasapainossa, mittaustulosten eroja ei voida arvioida prosentuaalisesti, koska mittaustulokset ovat pieniä ja pienet vaihtelut vaikuttavat liian voimakkaasti prosentteina laskettuna. Tulok-sista havaitaan, että mittausajankohdalla on suuri satunnainen merkitys sii-hen, minkälaisia tuloksia saadaan. Esimerkiksi ensimmäisen kerroksen ulko-oven 126 kohdalta tehdyssä mittauksessa viiden arkipäivän keskiarvo ajanjak-solla 4.-8.11.2019 on tasolla 7 pascalia ja 11.-15.11.2019 tasolla -26 pascalia. Pidempi mittausjakso tasoittaa tuota epävarmuutta, joten mahdollisimman pitkä mittausjakso varmistaa sen, etteivät mittauksiin tulevat virheet pääse lii-kaa korostumaan.

Minimi- ja maksimiarvojen kohdalta huomataan, kuinka suurta vaihtelu niiden tuloksissa on. Minimi- ja maksiarvoja ei tämän vuoksi voida käyttää mittaus-jakson pituuden määrittämiseen eikä myöskään ilmanvaihdon toiminnan arvi-ointiin. Yksikin satunnainen mittaustulos muuttaa minimi- tai maksimiarvon ai-van erilaiseksi riippuen siitä, kummasta ääripäästä ääriarvo mitataan. Esimer-kiksi mittauskohteessa voi siivooja tai tilankäyttäjä siirrellä tavaroita mittauk-sen aikana ja litistää hetkellisesti mittausletkua, jolloin hyvin lyhyen ajan mit-taustuloksissa näkyy lyhyt aikainen voimakas poikkeama. Tämä tulos näkyy mittaustulosten ääriarvoissa heti ja sitä ei voida käyttää ilmanvaihdon toimin-nan arvioinnissa.

4.2 Mittaustiheyden tarkastelu

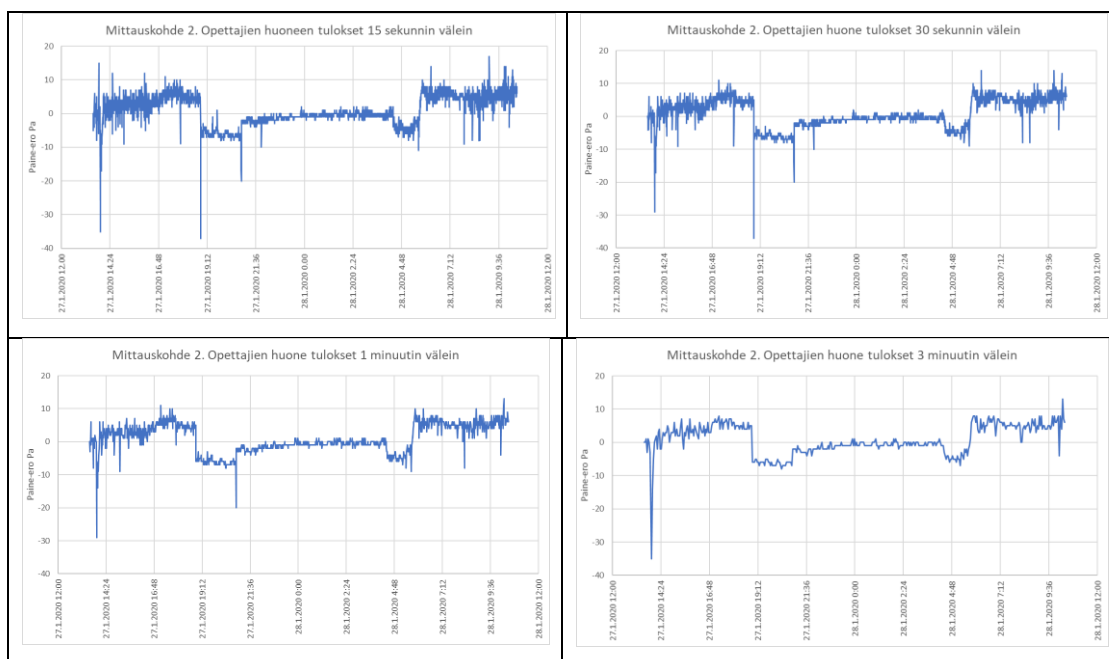
Paine-erojen seurantamittausten mittausjakson pituuden ja mittaustiheyden rajoittavana tekijänä on mittalaitteiden tallennuskapasiteetti. Yleisesti käytössä olevat mittalaitteet pystyvät tallentamaan noin 25 000 mittaustulosta. Kuvassa 5 on esitetty kuvaajia siitä, miten mittaustiheys vaikuttaa mittaustulosten määrään eri pituisten mittausjaksojen aikana. Kuvassa esitetty harmaa palkki kuvaa aluetta, jonka alueella ei useimpien mittalaitteiden tallennustila riitä.



kuva 5. Mittaustiheyden vaikutus mittaustulosten määrään 7, 14, 21 ja 28 vuorokauden mittausjaksojen aikana. Osakuvissa harminaa ovat alueet, joiden alueella mittaustulosten tallennuskapasiteetti ylittyy yleisesti käytettävillä mittalaitteilla.

Tiheällä mittaussvällillä, esimerkiksi viidentoista sekunnin mittaussvällillä, saadaan näkyviin lyhytkestoisia paine-eroipukkejä, joita voi tulla esimerkiksi ilmanvaihtokoneiden käynnistymisen ja sammumisen aikaan aikaohjelmien mukaisessa säännöllisessä toiminnassa. Mittausjakso lyhenee sitä enemmän mitä tiheämmäksi halutaan mittaussväli. Kun mittaussjaksoa halutaan pidentää, niin silloin joudutaan käyttämään harvempaa mittaustiheyttä. Lyhytkestoiset paine-eroipukit jäävät sitä useammin havaitsematta, mitä pidempi on mittaussväli. Kuvasta 4 nähdään myös, että tavanomaisella mittalaitteella pystytään mittaamaan puolen minuutin tai sitä harvemmillä tiheydellä seitsemän päivän mittauksen ja kahden viikon mittauksessa pitää olla minuutin mittaustiheys tai harvempi.

Kuvassa 6 on esitetty kohteen 2 mittausaineistosta tehtyjä kuvaajia erilaisilla mittausväleillä esitettyinä. Kuvista nähdään voimakkaiden alipainepiikkien häviävän näkyvistä, mitä pidempi on mittausväli. Esimerkiksi 15 sekunnin välein otetuissa tuloksissa voimakkaita alipainepeikkoja on enemmän kuin minuutin ja kolmen minuutin välein otetuissa tuloksissa. Mitä pidempi mittausväli on, sitä huonompi mahdollisuus on, että piikki osuu juuri mittauksen kohdalle. Alkuperäistä mittausaineistoa tarkastelemalla havaittiin, että 2–3 mittaustulosta on jokaisen voimakkaan alipaineen ajalta eli voimakas alipaine on kestänyt noin 30–45 sekuntia. Kuvassa 6 esiintyvä ensimmäinen voimakkaan alipaineen piikki ei ole pitkäkestoisempi kuin muut piikit, vaan se on sattuman vuoksi näkyvissä kaikilla mittaustiheyksillä.



Kuva 6. Alipainepeikkojen esiintyvyys 15 ja 30 sekunnin sekä 1 ja 3 minuutin välein otetuissa tuloksissa.

4.3 Laskennalliset tulokset

Kohteen 1 paine-erojen seurantamittauksen 1.–19.11.2019 tuloksista lasketut keskiarvot, mediaanit, minimi ja maksimi on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Paine-eromittausten 1. – 19.11.2019 keskiarvot, mediaanit, minimi ja maksimit.

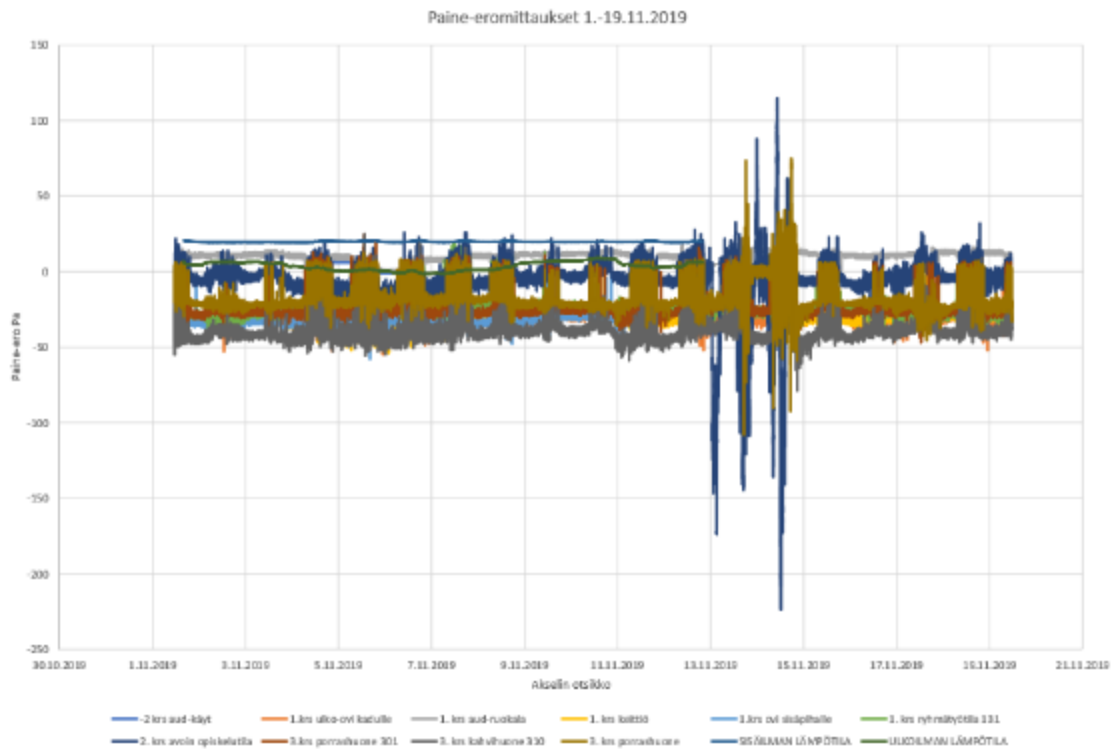
UI = ulkoilma	keskiarvo	Mediaani	Minimi	Maksimi
1.krs ulko-ovi kadulle - UI	-29	-30	-54	4
1. krs keittiö - UI	-29	-30	-54	11
1.krs ovi sisäpihalle - UI	-29	-31	-57	9
1. krs ryhmätötila - UI	-23	-24	-40	20
2. krs avoin opiskelutila - UI	-4	-4	-43	28
3.krs porrashuone 1 - UI	-24	-26	-40	25
3. krs kahvihuone - UI	-40	-41	-59	25
3. krs porrashuone 2 - UI	-19	-20	-38	12
Kaikkien tilojen keskiarvo	-25	-26	-48	17

Taulukon 1 mittaukset tehtiin tilanteessa, jossa ilmanvaihto ei ollut tasapainossa ja se näkyy keskiarvo ja mediaani sarakkeissa. Minimi ja maksimi arvot ovat hetkittäisistä poikkeamista saatuja mittaustuloksia. Minimi- ja maksimiarvot eivät kerro mittauskohteen ilmanvaihdon tasapainotilanteesta, koska yksittäinen mittaustulos muuttaa minimi- tai maksimiarvoa voimakkaasti. Minimi- ja maksimiarvoissa näkyvät mm. tuulen puuskat, ovien ja ikkunoiden aukomiset sekä ilmanvaihdon poikkeama piikit.

Liitteessä 1 on vertailtu eri pituisien mittausjaksojen minimi- ja maksimiarvoja kahden viikon mittauksen vertailuarvoon. Liitteen tuloksia tarkastelemalla huomataan, kuinka suurta on minimien ja maksimien vaihtelu. Ilmanvaihdon aiheuttamien poikkeamapiikkien löytämiseksi tarvitaan kokemusta paine-eromittausten tulkinnasta, jotta voidaan erottaa, mitkä piikeistä ovat ilmanvaihdon aiheuttamia ja mitkä ovat häiriöistä aiheutuneita. Tulosten tulkinnassa tärkeää on se, että pystyy tiedostamaan mittaustiheyden vaikutuksen mittaustulosten esiintyvyyteen ja hyödyntämään esimerkiksi tuulitietoja mittaustulosten tulkinnassa. Minimi- ja maksimiarvojen laskennan käytöllä mittaustulosten raportoinnissa ei ole perusteita, koska niiden antama tieto kohteen ilmanvaihdon toiminnasta ei ole relevanttia.

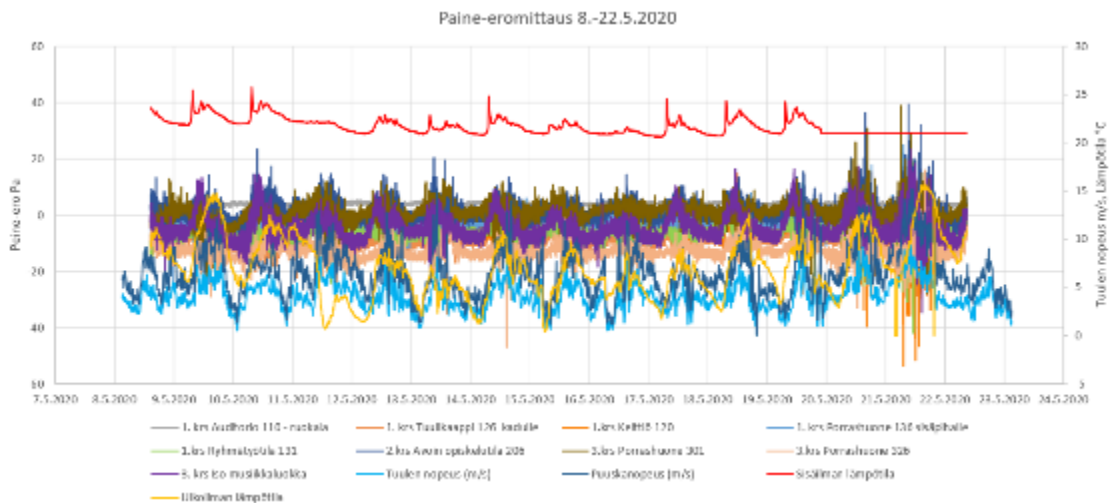
4.4 Perinteisten kuvaajien tarkastelu

Ilmanvaihtokoneen käyntiajat ja rakennuksessa tapahtuva toiminta nähdään perinteisessä kuvaajassa. Kuvassa 7 nähdään kuinka rakennuksen käytön aikana paine-erot vaihtelevat enemmän kuin yöaikaan. Rakennuksen käytön aikana mm. ovien aukomiset vähentävät alipainetta huomattavasti rakennuksen ilmanvaihdon ollessa huomattavasti epätasapainossa.



Kuva 7. Paine-erokuvaaja kaikki tulokset marraskuu 2019.

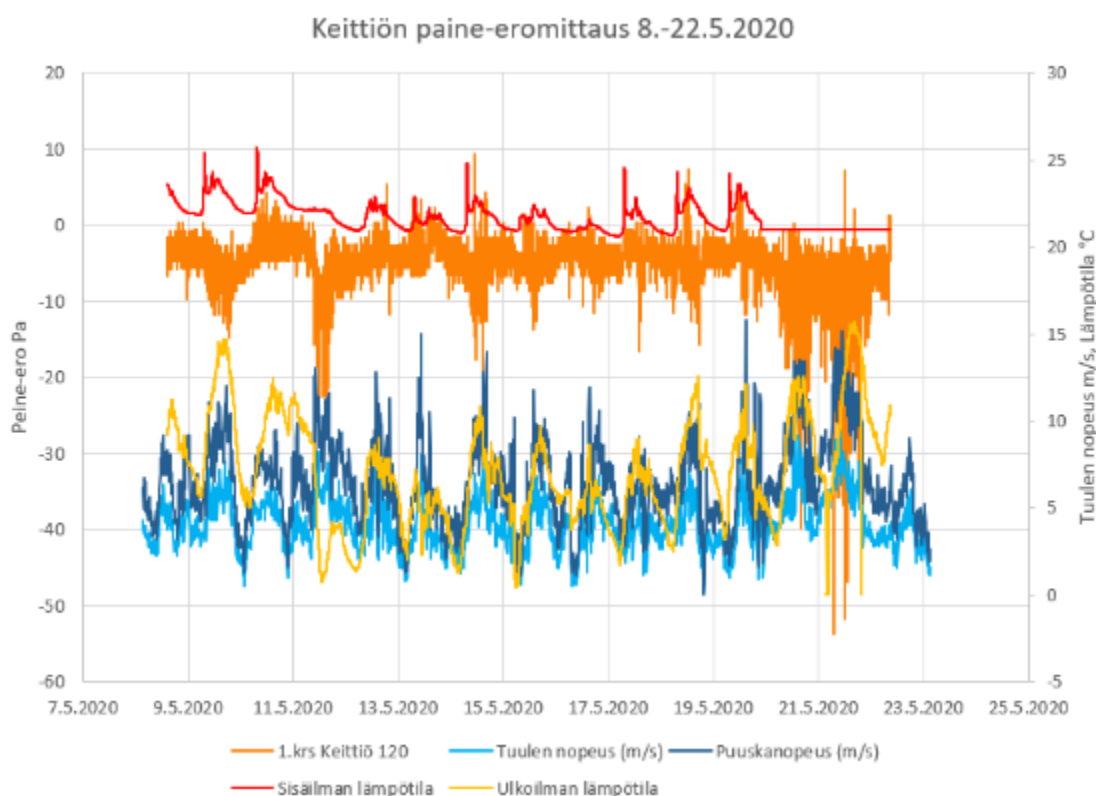
Kuvassa 8 ei nähdä samanlaista eroa käytön ja yöaikaisten tulosten välillä, koska ilmanvaihto on paremmin tasapainossa ja normaalitilanteessa lähempänä 0 Pa paine-eroa.



Kuva 8. Paine-erokuvaaja kaikki tulokset toukokuu 2020.

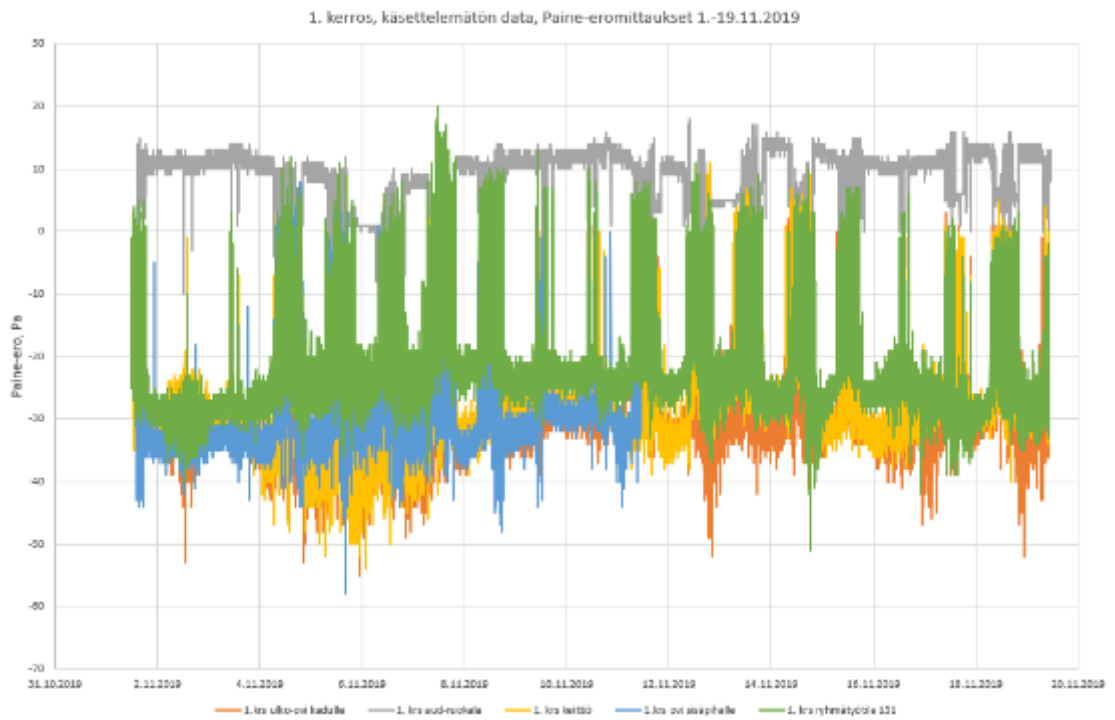
Yksittäisten mittaustulosten osalta on vaikea tulkita kuvaajaa, koska käyrät ovat osittain tai kokonaan toistensa päällä. Mittaustulosten kuvaajia on helpompaa tulkita, kun tulokset esitetään esimerkiksi yksittäisten huonetilojen, ilmanvaihtokoneen palvelualueiden tai kerroksien mukaan lajiteltuina pienempiin osiin.

Kuvassa 9 nähdään miten tuuli vaikuttaa mittausjakson loppupuolella keittiön paine-eromittauksiloksiin aiheuttaen voimakkaita alipainepeikkejä. Kun mittausloksi on kuvaajassa vähemmän, saadaan paremmin näkyviin lämpötilamittauslokset sekä kuvaajat tuuliolosuhteista. Lämpötila- ja tuuliolosuhteet auttavat tulkitsemaan mittausloksiä paremmin, koska tuulisena päivänä voidaan havaita voimakkaitakin painesuhteiden vaihteluita. Kuvan 9 tuloksista nähdään, että mittausjakson lopulla on ollut tuulinen jakso. Kuvasta 8 ei voida nähdä keittiön tuloksia lähes ollenkaan.

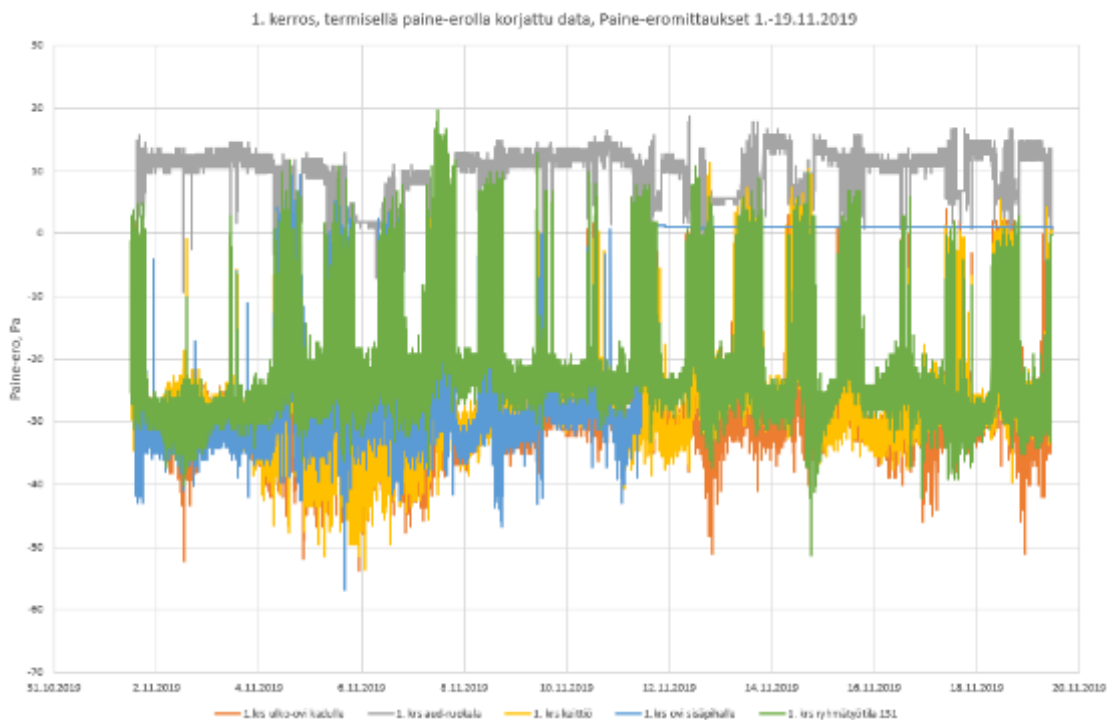


Kuva 9. Keittiön paine-erokuvaaja toukokuu 2020.

Kuvassa 10 nähdään suoraan mittalaitteesta saadusta mittausaineistosta tehty perinteinen kuvaaja. Kuvassa 11 on termisellä paine-erolla korjattuna sama mittausaineisto kuin kuvassa 10.



Kuva 10. Perinteinen kuvaaja käsittelemättömästä aineistosta.

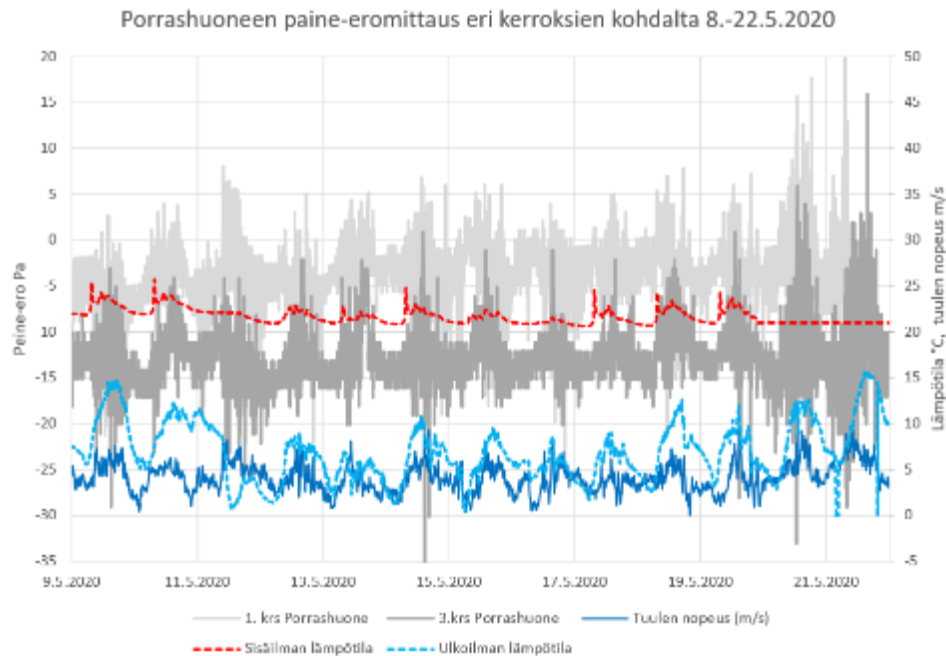


Kuva 11. Perinteinen kuvaaja termisellä paine-erolla korjatuilla tuloksilla.

Kuvien 10 ja 11 käyrät ovat hyvin samanlaisia eikä suuria eroja ole havaittavissa. Tarkemmin katsottaessa havaitaan kuitenkin esimerkiksi se, että kuvassa 11 oranssilla värillä esitetyn käyrän alipainepiikit ovat hieman pienem-

piä termisellä paine-erolla korjatuissa tuloksissa verrattaessa käsittelemättömiin tuloksiin. Termisen paine-eron kompensoinnin hyötyjä ei saada riittävän selkeästi esitettyä perinteisten kuvaajien avulla.

Paine-eromittausten tuloksia on esitetty perinteisessä kuvaajassa kuvassa 12. Kuvassa nähdään, kuinka koulukohteen 1 porrashuone on porrashuoneen ensimmäisessä kerroksessa hieman alipaineisempi kuin kolmannen kerroksen mittauspisteessä. Tämä on termiselle paine-erolle tyypillinen ilmiö, joka pyrkii luomaan alipainetta tilan alaosiin ja ylipainetta tilan yläosiin (Björkroth & Eskola 2019, 9).

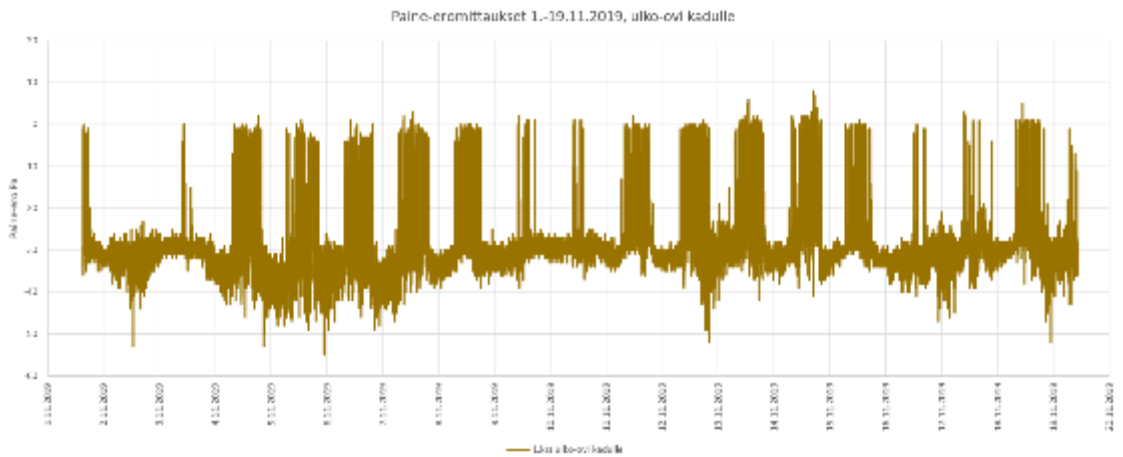


Kuva 12. Porrashuoneen paine-eromittaukset. Mitatut paine-erot ovat ulkoilmaan nähden mitattuja. Termisen paine-ero korjattu mitatun kerroksen referenssitason.

Molemmissa mittauspisteissä mittaukset tehtiin ulkoilmaan nähden. Mittauksia tehtiin muissa tiloissa seurantamittauksina ulkoilmaan nähden ja pääsääntöisesti hetkellisinä mittauksina sisätilojen välisissä mittauksissa. Hetkellisissä mittauksissa ei havaittu suuria paine-eroja muihin tiloihin nähden. Alimmassa kerroksessa porraskäytävän viereisessä aulatilassa on kaksi uloskäyntiä kahteen eri ilmansuuntaan ja lisäksi porrashuoneen kautta on läpikulkua ulos ja ylempiin kerroksiin. Tuuli aiheutti myös vaihtelua mitaustuloksiin mittauspäivien aikana. Näiden mittaukseen vaikuttavien tekijöiden vuoksi huomataan, että muilla tekijöillä on mitaustulokseen tässä tapauksessa suuri vaikutus. Eri-tyyppisesti tuuli ja tilojen käyttö vaikuttivat suuresti mitaustuloksiin.

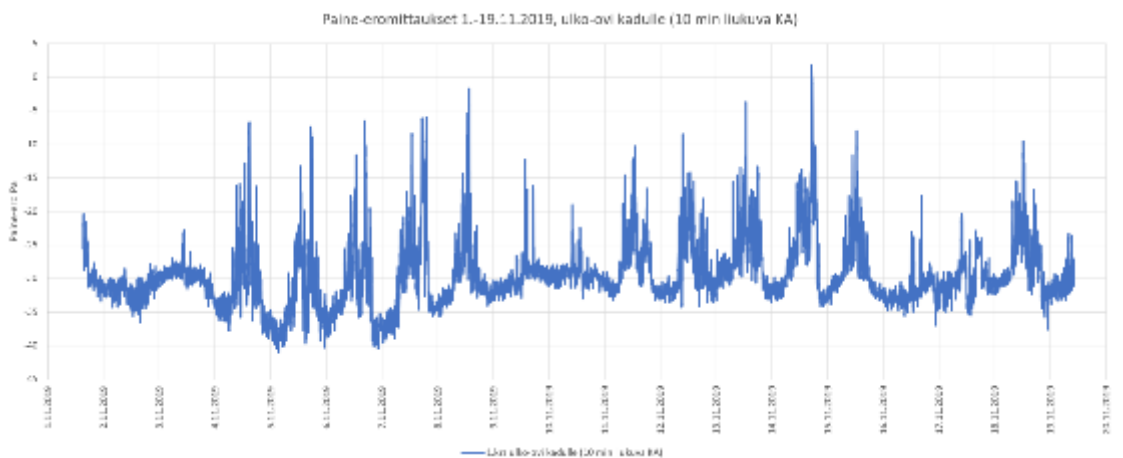
4.4.1 Liukuvan keskiarvon vaikutukset tuloksiin

Perinteisissä kuvaajissa voi olla mittaustuloksia, jotka vaihtelevat jatkuvasti voimakkaasti, kuten kuvassa 13 tehdyssä mittauksessa. Kuvan 13 tapauksessa nähdään, miten voimakkaasti alipaineisen tilan paine-ero menee lähelle nollaa ovien aukomisen vaikutuksesta. Mittaus on tehty ulko-ovesta kadulle.



Kuva 13. Voimakkaasti alipaineinen tila. Paine-ero normaalitilanne ja ovien aukomisen aikana.

Kun samasta mittausaineistosta lasketaan kymmenen minuutin liukuva keskiarvo, niin saadaan esille paremmin mitattavan kohteen ilmanvaihdon aiheuttama paine-erotaso. Kuvassa 14 on esitetty saman tutkimusaineiston mittaus-tuloksia kymmenen minuutin liukuvalla keskiarvolla laskettuina kuin kuvan 13 kuvaajassa.



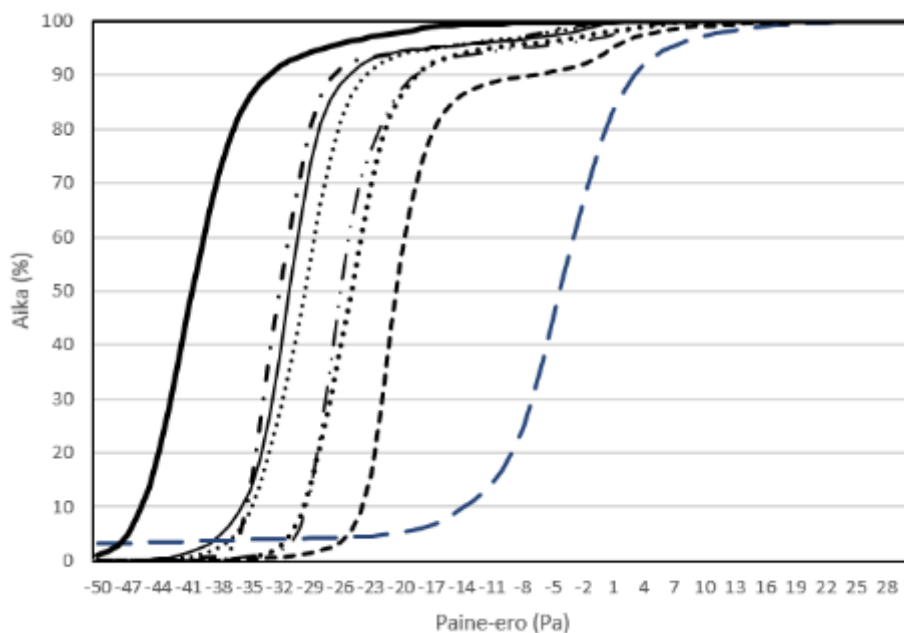
Kuva 14. Voimakkaasti alipaineinen tila 10 minuutin liukuvalla keskiarvolla laskettuna.

Näistä liukuvan keskiarvon tuloksista saadaan yleiskuva tilanteesta. Yksityiskohtaisiin tulosten tulkintoihin liukuvalla keskiarvolla laskettuja tuloksia ei

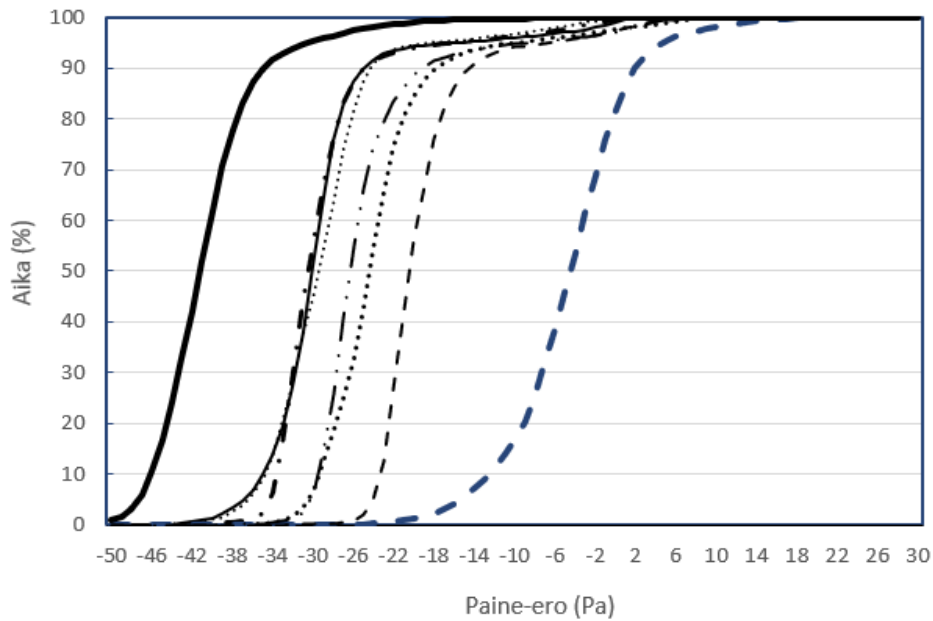
voida käyttää, koska tuloksista on keskiarvon laskennalla häivytetty yksittäisiä poikkeamia. Liukuvan keskiarvon tuloksissa yksittäiset poikkeamat katoavat lähes kokonaan tai ovat pienempiä kuin alkuperäisissä tuloksissa.

4.5 Pysyvyyskäyrien tarkastelu

Pysyvyyskäyrät paine-eromittauksista on esitetty kuvissa 15 ja 16. Kuvassa 15 on mittaustulokset ennen termisellä paine-erolla korjausta ja kuvassa 16 on mittaustulokset korjauksen jälkeen. Kuvissa 15 ja 16 jokainen käyrä kuvaa yhdestä mittauspisteestä saatuja tuloksia. Kuvia vertaamalla havaitaan, että termisellä paine-erolla korjatuissa tuloksissa käyrien molemmista päistä tulokset tasoittuvat. Pysyvyyskäyrien noin 0–5 % ja 90–100 % aikaväleillä on lyhytkestoisia virheitä kohteesta 1 saaduissa mittaustuloksissa. Näitä virheitä aiheutuu mm. tuulen ja tilojen käytön vaikutuksesta sekä mittalaitteiden aiheuttamasta virheestä. Tampereen teknillisen yliopiston tutkimuksessa vuodelta 2009 on kriittisyystasoksi asetettu 10 %:n taso eli aikavälit 0–10 % ja 90–100 % (Vinha ym. 2009, 84–85). Rakennusten paine-erojen mittausohjeessa kehoitetaan rakennuksen käyttäjistä ja sääolosuhteista johtuvat häiriöt poistamaan mittaustuloksista (Björkroth & Eskola 2019, 190). Termisen paine-erokorjauksen avulla mittaustuloksista saadaan mittausrvirheitä pois.



Kuva 15. Pysyvyyskäyrät, joihin ei ole tehty termisen paine-eron kompensointia



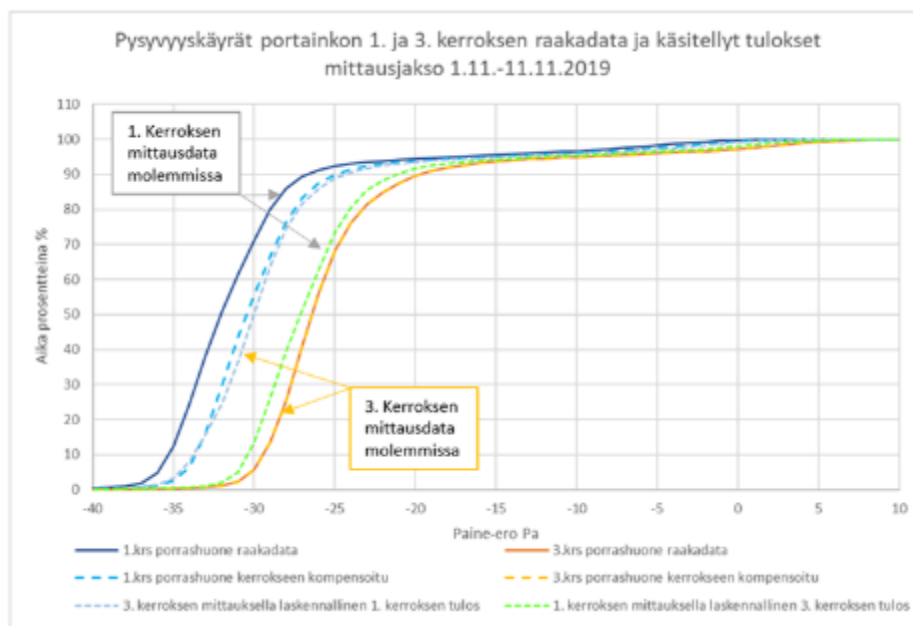
Kuva 16. Pysyvyyskäyrät termisellä paine-erolla korjattuina.

Termisen paine-eron kompensointia tutkittiin laskennallisesti porrashuoneen alimmassa ja ylimmässä kerroksessa tehtyjen mittausten avulla. Termisen paine-eron kompensoinnilla saatiin ensimmäisen kerroksen mittaustuloksilla laskettua kolmannen kerroksen tulokset ja päinvastoin. Laskennalliset tulokset olivat hyvin lähellä mitattuja tuloksia. Taulukossa 2 on esitetty suoraan mittalaitteista saadut tulokset, termisen paine-eron mittauserroksen referenssitasolle korjatut tulokset sekä kerrosten väliset laskennalliset tulokset.

Taulukko 2. Paine-eromittausten raakadata ja käsitellyt mittaustulokset.

	1.11.-19.11.2019		8.5.-21.5.2020	
	Keskiarvo	Mediaani	Keskiarvo	Mediaani
1.krs porrashuone raakadata	-30	-32	-5	-5
1.krs porrashuone kerrokseen kompensoitu	-29	-31	-4	-4
3. kerroksen mittauksella laskennallinen 1. kerroksen tulos	-29	-30	-3	-3
3.krs porrashuone raakadata	-24	-26	1	1
3.krs porrashuone kerrokseen kompensoitu	-24	-26	1	1
1. kerroksen mittauksella laskennallinen 3. kerroksen tulos	-26	-27	-1	-1
Sisä- ja ulkoilman lämpötilaero	11,0 – 21,9 °C		8,3 – 21,4 °C	

Kuvassa 17 on esitetty 1.–11.11.2019 mittauksista suoraan saadut ja termisellä paine-erolla korjatut mittaustulokset sekä laskennallisten tulosten pysyvyyskäyrät toiselle tasolle kompensoituina.



Kuva 17. Pysyvyyskäyrät termisellä paine-erolla korjattuina.

Pysyvyyskäyristä nähdään, kuinka laskennalliset mittaukset vastaavat todellisia mittaustuloksia. Kuvaajan avulla saadaan hyvä käsitys siitä, että termisen paine-eron kompensointia voidaan tehdä eri korkeuksille tutkittavaa tilaa ja tulokset saadaan luotettavasti laskettua halutulle korkeudelle. Kolmannen kerroksen mitattu tulos ja kerroksen referenssitason termisen paine-eron kompensointi ei vaikuta juurikaan tulokseen, koska mittauskorkeus on ollut vain 20 senttimetriä referenssitason alapuolella. Termisen paine-eron vaikutuksen vähäisyyteen vaikuttaa myös se, että sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero ei ole ollut kovinkaan suurta ulkoilman ollessa lähes koko mittausjakson ajan nollan yläpuolella. Pysyvyyskäyrässä nämä kaksi käyrää ovat päällekkäin. Tällaisessa tilanteessa termisenpaine-eron kompensointia ei tarvitse tehdä. Ensimmäisen kerroksen mittauspisteen mittauskorkeus oli 1,65 metriä eli mittauspiste oli 65 senttimetriä referenssitason korkeammalla. Termisen paine-eron korjaus muuttaa mittaustuloksia selvästi. Paine-erojen mittausohjeen mukainen termisen paine-eron korjaus on hyvä tehdä ohjeistuksen mukaisesti, kuten näistä tuloksista nähdään (Björkroth & Eskola 2019, 27). Kuvassa 17 näkyy myös tilojen käytön vaikutus mittaustuloksiin aikavälillä 95–100 %, jolloin mm. ovien aukomisesta aiheutuvaa virhettä näkyy mittaustuloksissa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Seurantamittausten kestona 2 viikkoa on hyvä mittausjakson pituus, koska silloin nähdään rakennuksen käytönaikainen ja käyttöajan ulkopuolinen paineerotilanne myös viikonloppujen osalta kahtena eri mittausajankohtana riittävän hyvällä tarkkuudella. Mittauksen ajoituksen vuoksi voi tulla suuriakin satunnaisia vaihteluita, kuten tässä tutkimuksessa nähtiin viiden päivän mittausjaksojen tuloksissa kahtena eri jaksoneen toisistaan poikkeavia tuloksia.

Mittaustiheyden osalta minuutin mittausväli on sopiva käytettäväksi ilmanvaihdon toimivuuden selvittämiseksi. Minuutin mittausvälillä tulevat esille ilmanvaihtokoneiden käyntiaikojen muutoskohdissa mahdolliset alipainepiikit 1–2 viikon seurantamittauksen aikana. Tämän jälkeen voidaan kohdentaa mittauksia tiettyihin ilmanvaihtokoneiden palvelualueisiin ja tehdä lyhytkestoisempia mittauksia tiheämmällä mittausvälillä ongelman selvittämiseksi. Harvemmillä mittaustiheydellä mittausten kohdalle osuu harvemmin poikkeamapiikkejä ja tulosten tulkinta vaikeutuu. Kun poikkeamat eivät toistu säännöllisesti mittaustilanteissa, ei poikkeamia osata välttämättä yhdistää ilmanvaihtojärjestelmästä johtuviksi ja ne saattavat jäädä kokonaan huomioimatta.

Mittaustiheys ja mittausjakson pituus vaikuttavat suoraan toisiinsa ja niitä rajoittaa mittalaitteiden tallennuskapasiteetin rajallisuus. Minuutin mittausvälillä tehty noin kahden viikon mittausjakso on sellainen, että nykyisi yleisesti käytössä olevat mittalaitteet pystyvät sen mittaamaan ja saamaan kattavat ja riittävän pitkältä ajalta tuloksia.

Keskiarvo ja mediaani soveltuvat hyvin paine-erojen tulosten tarkasteluun graafisten kuvaajien rinnalla. Paras kuva tuloksista saadaan, kun käytetään perinteistä kuvaajaa, pysyvyyskäyrää ja numeerisina menetelminä keskiarvon ja mediaanin laskentaa rinnakkaisina esitystapoina. Jokaisella menetelmällä on omat hyvät puolensa ja ne täydentävät toisiaan. Perinteisestä kuvaajasta nähdään yleiskuva ja poikkeamapiikit, pysyvyyskäyrästä keskimääräinen tilanne ja numeerisesta laskennasta saadaan tarkka keskiarvotieto. Minimi ja maksimi eivät sovellu paine-eromittaustulosten tulkintaa, koska ne ovat ääriarvoja, joilla ei ole juurikaan merkitystä ilmanvaihdon toimivuuden kannalta. Liu-

kuvan keskiarvon käyttö soveltuu perinteisen kuvaajan muokkaamiseen silloin, kun kuvaajassa on suurta vaihtelua ja halutaan saada selkeämpi kuvaaja paine-erojen keskimääräisen tason tarkastelua varten. Liukuvan keskiarvon kuvaajasta ei voida tarkastella yksityiskohtia luotettavasti, koska ne ovat käsitellyjä tuloksia ja poikkeavat arvot ovat pienemmät kuin alkuperäisessä aineistossa.

Pysyvyyskäyrä on hyvä apuväline paine-eromittausten tulosten tulkinnassa. Pysyvyyskäyrien avulla voidaan havaita mittausrvirheitä helpommin kuin perinteisestä graafisesta kuvaajasta, koska virheet kasautuvat pysyvyyskäyrien ääriarvoihin. Paine-erojen pysyvyyskäyristä saadaan käyrien alku- ja loppupäästä virhettä pois termisen paine-eron kompensoinnin avulla. Pysyvyyskäyristä nähdään selkeämmin myös keskimääräinen paine-erotaso kuin perinteisistä kuvaajista. Pysyvyyskäyrien tulkinnassa 10 %:n kriittisyystaso toteutuu tässä tutkimuksessa virheiden painottuen aikajaksoille 0...10 % ja 90...100 %.

Termisen paine-eron huomioiminen mittaustuloksissa on hyödyllisintä tehdä tilanteissa, joissa mittauksia joudutaan tekemään yhden metrin referenssitilasta poikkeavilta mittauskorkeuksilta. Mittaustulosten termisen paine-eron kompensointi korostuu talvella, jolloin sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on suurimmillaan kovilla pakkasilla. Tässä tutkimuksessa mittauksia on tehty ulkoilman lämpötilan ollessa suurimman osan ajasta 0 °C yläpuolella, mutta silti termisen paine-eron vaikutusta mittaustuloksiin on nähtävissä. Termisen paine-eron huomioimisen avulla saadaan paremmin todellista tilannetta vastaavia tuloksia.

Käytännön tilanteissa aina mittaustuloksiin vaikuttavat mm. mittalaitteiden aiheuttamat virheet, ilmanvaihdon mahdollinen epätasapaino, sääolosuhteet, tuuli ja rakennuksen käytöstä aiheutuvat virheet kuten ovien ja ikkunoiden aukominen mittausten aikana sekä lämpöolosuhteiden vaihtelut tilan eri korkeuksilla. Termisen paine-eron laskennassa rakennuksen yhtenäistä tilaa olevissa eri kerroksissa tai korkeissa tiloissa tehdyissä mittauksissa voi tulla ongelmaksi mm. tuulesta ja tilojen käytöstä aiheutuva virhe, lämpöolosuhteiden vaihtelut korkean tilan eri korkeuksilla sekä mahdollisesti myös eri kerroksien muiden tilojen erilaisten paine-erojen vaikutus lopulliseen laskennalliseen tulokseen.

Termisen paine-eron kompensoinnissa olisi hyvä huomioida erityisesti korkeissa tiloissa myös se, että lämmin ilma pyrkii tilan yläosaan eli korkean tilan yläosassa on lämpimämpää kuin alaosissa. Korkeiden tilojen lämpötilaprofiili on kohdekohtainen riippuen mm. vuodenajasta ja ulko-ovien määrästä mitattavassa tilassa. Termisen paine-eron laskennassa käytettävän sisäilman lämpötilan mittausta ei ole ohjeistettu Paine-erojen mittausohjeessa (2019), jossa kuitenkin käsitellään lämpötilamittaustuloksilla tehtäviä termisen paine-eron kompensointeja. Lisäohjeistusta tarvitaan lämpötilan mittaamisesta korkeissa tiloissa luotettavasti, jotta termisen paine-eron laskenta voidaan tehdä luotettavasti. Usean kerroksen porrashuoneessa lämpötilan vaihtelua olisi jossakin tutkimuksessa hyvä tarkastella erityisesti kylmänä vuodenaikana, jolloin sisä- ja ulkoilman lämpötilaero ja alimpien kerrosten alipaine ovat suurimmillaan. Tutkimuksesta olisi hyvä saada tietoa siitä, että riittääkö lämpötilan mittaus korkean tilan puolivälistä ja kuinka paljon tulee virhettä, jos mittaukset tehdään alimmalta tai ylimmältä tasolta. Paine-eromittauksissa olisi hyvä saada mahdollisimman paljon mittauksia tehtyä asetetulta referenssikorkeudelta, jolloin saadaan paras kuva todellisesta tilanteesta juuri siinä kohdassa, jossa mittaus on tehty, jolloin esimerkiksi korkean tilan lämpötilaprofiili ei pääse vaikuttamaan mittaustuloksiin.

Paine-eroille olisi hyvä saada jonkinlaiset hyväksyttävyyssrajat, jotta tulosten tulkinta olisi jatkossa helpompaa. Rakennusten paine-erojen raja-arvojen asianta on haastavaa, koska paine-eromittauksiin liittyy paljon siihen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä. Haasteita hyväksyntärajojen asettamiselle luo myös ulkoisten tekijöiden riittävä huomiointi niin, ettei kuitenkaan tehdä raja-arvojen toteuttamisesta liian vaikeaa. Paine-erojen raja-arvoasetannassa tulisi selvittää pysyvyyssäyriä ja liukuvan keskiarvon käytön mahdollisuutta saman tyyppiseen raja-arvoasetantaan, kuin mitä Sisäilmastoluokitus 2018 on määrittänyt lämpötilojen seurantamittausten raja-arvojen osalta.

LÄHTEET

Björkroth, M. 2021. LVI-asiantuntija. Haastattelu 12.3.2021. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

Björkroth, M. & Eskola, L. 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohje - projektin loppuraportti. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> [viitattu 18.1.2021].

Clinchard, S. Aller, R. della Vecchia, S & Haverinen-Shaughnessy, U. 2020. Continuous monitoring of differential pressure – Effects on indoor air quality. Sisäilmastoseminaari 2020. SIY raportti 38, 213–216.

D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. 1/11 Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. 30.3.2011.

D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta. Ohjeet 2012. 6/13 Ympäristöministeriön ohjeet rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta. 17.5.2013.

Eskola, L. Björkroth, M. Kosonen, R. & Vinha, J. 2020. Rakennusten paine-erojen mittausohje. Sisäilmastoseminaari 2020, SIY raportti 38, 190–194.

Euroopan Unioni. s.a. NZEB. WWW-sivu. Saatavissa: <https://nzeb.in/definitions-policies/international-roadmaps/european-union-eu/> [viitattu 7.9.2020].

Gemini Data Loggers (UK) Ltd. 2019a. Data sheet. Tinytag Plus 2 Dual Chanel Temperature/Relative Humidity (-25 to +85°C/0 to 100% RH) TGP-4500. Issue 13. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://gemini2.assets.d3r.com/pdfs/original/3751-tgp-4500.pdf> [viitattu 17.4.2021].

Gemini Data Loggers (UK) Ltd. 2019b. Data sheet. Tinytag Ultra 2 Temperature/Relative Humidity Logger (-25 to +85°C/0 to 95% RH) TGU-4500. Issue 11. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://gemini2.assets.d3r.com/pdfs/original/3769-tgu-4500.pdf> [viitattu 17.4.2021].

Humitec Oy. 2014. Differential pressure measuring instrument. Testo 521-Precise Pitot tube measurement. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.humitec.fi/wp-content/uploads/2014/08/testo_521.pdf [viitattu 17.4.2021].

Ilmatieteenlaitos s.a. Ilmakehä-ABC. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?ini=I> [viitattu 13.3.2021].

Jokinen, L., Pessi, P. & Laine, T. 2014. Luku 12. Esimerkkejä tavanomaisten ilmastointilaitosten suunnittelusta. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja

rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointiteknikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 319–364.

Kippo, A. K. & Tikka, A. 2008. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Edita Prima Oy.

Moisio, T. Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2019. Rakennuksen ulkovaipan yli vaikuttavien paine-erojen määrittäminen rakennusfysikaalisia laskenta tarkasteluja varten. Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. Seminaarijulkaisu 6 – osa 1. Tampere, 49–54.

Reinikainen, E. Loisa, L. & Tyni, A. 2015. FInZEB-hanke. Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla. Loppuraportti. Hankkeen sisältö ja tulokset. PDF-dokumentti. Saatavissa:

https://www.talteka.fi/sites/default/files/file_attachments/finzeb_loppuraportti.pdf [viitattu 20.4.2021].

RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. 2020. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hansaprint Oy.

RT 07-11299, Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennustietokauppa.fi/sivu/tuote/rt-07-11299-sisailmastoluokitus-2018-sisaympariston-tavoitearvot-suunnitteluohjeet-ja-tuotevaatimukset/2742604> [viitattu 10.4.2021].

Sandberg, E. & Hänninen, R. 2014. Luku 0. Johdanto. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointiteknikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 7–20.

Sandberg, E & Koskela, H. 2014. Luku 4. Ilmavirran mitoitusperiaatteet. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointiteknikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 97–111.

Sandberg, E. & Railio, J. 2014. Luku 1. Ilmastointilaitoksen kuvaus ja säädökset. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointiteknikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 21–35.

Sandberg, E & Ripatti, H. 2014. Luku 5. Ilmanvaihtojärjestelmät. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointiteknikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 113–128.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet. 2/11 Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. 30.3.2011.

Säteri, J. & Koskela, H. 2014. Luku 2. Sisäilmasto. Teoksessa Sandberg, E. (toim.) Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy, 37–79.

Vinha, J. Korpi, M. Kalamees, T. Jokisalo, j. Eskola, L. Palonen, J. Kurnitski, J. Aho, H. Salminen, M. Salminen, K. & Keto, M. 2009 Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 140. Tampere.

