



ILMANVAIHDON KULUTUSJOUSTON KÄYTTÖNOTON VAIKUTUS PAINEROIHIN RAKENNUSVAIPAN YLI

Case Medistudia

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Isa Korpela

Tarkastajat: Dosentti, tutkijaopettaja Ahti Jaatinen-Värri

Tutkijaopettaja Mika Luoranen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Isa Korpela

Ilmanvaihdon kulutusjouston käyttöönoton vaikutus paine-eroihin rakennusvaipan yli (Case Medistudia)

Energiatekniikan diplomityö

2023

67 sivua, 12 kuvaa, 6 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, tutkijaopettaja Ahti Jaatinen-Värri ja tutkijaopettaja Mika Luoranen

Avainsanat: Sähkön kysyntäjousto, kulutusjousto, paine-eromittaus, painesuhteet

Diplomityössä tutkitaan, vaikuttaako sähkön kulutusjouston käyttöönotto rakennuksen ilmanvaihdossa paine-eroihin rakennusvaipan yli. Kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan kulutusjouston käyttöä erityisesti ilmanvaihtojärjestelmissä, kiinteistöjen painesuhteisiin vaikuttavia tekijöitä, sekä rakennusvaipan yli muodostuvan paine-eron tavoitetasoa tyypillisille rakennuksille Suomessa. Työssä esitellään paine-eromittausten luotettavia mittaustapoja.

Case-tutkimuksen kohteena tutkittiin opetusrakennusta yhdeksällä väliaikaisella paine-eron seurantamittauksella. Paine-eroa mitattiin rakennusvaipan yli eri ilmansuuntiin ja rakennuksen kaikissa kolmessa kerroksessa. Tutkimusjakso jakautui kahteen osaan. Normaalijaksolla ilmanvaihto oli normaalikäytössä. Seuraavalla jaksolla ilmanvaihdon tehoa säädettiin asetettujen minimi- ja maksimirajojen sisällä kulutusjoustosignaalin mukaan.

Kohteella ei havaittu kulutusjouston aiheuttavan muutosta paine-eroissa. Ero mittausjaksojen välillä oli 0,3 Pa. Työn tulosten perusteella rakennusten omistajia suositellaan pitämään huolta ilmanvaihtojärjestelmän säännöllisestä säätämisestä, mikä on erittäin tärkeä asia rakennuksissa muutenkin ilman ilmanvaihdon kulutusjoustoja. Kulutusjousto on yksi tekijä, jonka myötä ilmanvaihtojärjestelmät monimutkaistuvat, ja paine-eron seurantamittausten suorittaminen säätötöiden jälkeen tai kiinteiden mittausten asentaminen uusiin rakennuksiin muuttuu entistä tärkeämmäksi. Aikaisempaan yleiseen käytäntöön, jossa ilmamäärät säädetään ja mitataan vain mitoitusohjelmalla, tulisi lisätä tarkastusmittaukset myös osatehoilla.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Isa Korpela

The effect of demand response on differential pressure over building envelope (Case Medistudia)

Master's thesis

2023

67 pages, 12 figures, 6 tables and 3 appendices

Examiners: Docent, Associate Professor Ahti Jaatinen-Värri and Associate Professor Mika Luoranen

Keywords: Frequency regulation, demand response, differential pressure, pressure gradient

This thesis investigates if the demand response in ventilation impacts the differential pressure on the building envelope. The literature review studies the application of demand response, particularly in air handling units, factors affecting pressure differences in a building, and the required level of pressure difference on the building envelope for buildings in Finland. The effective methods for measuring pressure difference are investigated.

The case study focuses on a university building. The differential pressure of nine rooms on three floors in different cardinal directions was measured. There were two periods of measurement. After two weeks of normal ventilation operation, demand response was implemented in building ventilation.

There was no significant change in the differential pressure. The average differential pressures between the two measurement periods differ by 0.3 Pa. The findings of this study highlight the importance of cleaning and adjusting ventilation systems. Demand response is a complicating factor for ventilation systems. In the future, measuring the pressure difference will become increasingly vital. Typically, air flow rates are only measured at the design power level. In the future, air volumes should also be measured in terms of their partial power levels.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Asetus	
aFRR	Automaattinen taajuuden palautusreservi	
FFR	Nopea taajuusreservi	
FCR	Taajuuden vakautusreservi	
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi	
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi	
FRR	Taajuuden palautusreservit	
L	Laki	
mFRR	Säätöenergiamarkkina	
MP	Mittauspiste	
n_{50}	Ilmanvuotoluku	[1/h]
PF	Poistopuhallin	
RakMK	Rakennusmääräyskokoelma	
RH	suhteellinen kosteus	[%RH]
RTA	Rakennusterveyden asiantuntija	
t	Lämpötila	
TF	Tuloilmapuhallin	
TK	Ilmanvaihtokone, tuloilmakone	
UTC	Koordinoitu yleisaika	
wd	Tuulen suunta	[°]
wg	Tuulen puuskanopeus	[m/s]
ws	Tuulen keskinopeus	[m/s]

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Tavoitteet ja rajaus	10
1.3	Työn rakenne.....	11
2	Energiamurros, kysyntäjousto ja kulutusjousto.....	12
2.1	Energiamurros ja sähkönkäyttö.....	12
2.2	Sähkömarkkina Suomessa.....	13
2.3	Säätösähkö- ja reservimarkkinat	14
2.4	Kysyntäjousto säätösähkö- ja reservimarkkinoilla.....	16
2.5	Kulutusjousto kiinteistön omistajan näkökulmasta.....	17
2.6	Kulutusjousto ilmanvaihdossa	18
3	Kiinteistön paine-erot	22
3.1	Terminen paine-ero	22
3.2	Tuuli	23
3.3	Rakenne ja tiiviys	24
3.4	Ilmanvaihto ja rakennuksen käyttö	25
3.5	Kosteus ja epäpuhtaudet.....	30
3.6	Paine-erojen tavoitetaso ja suunnittelu.....	32
3.7	Paine-eron mittaaminen	34
3.7.1	Laitteiden vaatimukset.....	36
3.7.2	Asennus.....	36
4	Yliopistorakennuksen paine-erojen mittaaminen	38
4.1	Tutkittavan kohteen nykytila.....	38
4.2	Mittausjärjestelyt Medistudiolla.....	40
4.2.1	Paine-eron tarkkuustarkastelu.....	41

4.2.2	Asennus.....	41
4.3	Kerättävä data.....	43
5	Tulokset ja niiden arviointi.....	45
5.1	Kulutusjouston pyynnit testiajanjaksolla	45
5.2	Säädädata ajanjaksolla	47
5.3	Paine-erot normaalijaksolla.....	48
5.4	Paine-erot kulutusjoustojen aikana	51
5.5	Tulosten arviointi	55
6	Yhteenveto.....	57
7	Jatkotutkimusaiheet	60
	Lähteet	62

Liitteet

Liite 1. MIRAN DLS IAQ.THB+CO2+DP -anturin tekniset tiedot

Liite 2. Mittaustulokset normaalijaksolla

Liite 3. Mittaustulokset kulutusjoustoajaksolla

1 Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee kiinteistöjen ilmanvaihdon hyödyntämistä sähkön kulutusjoustossa ja sen vaikutusta paine-eroihin rakennusvaipan yli. Johdantoluvussa käsitellään työn taustaa, tavoitteita ja esitellään rajaus sekä työn rakenne.

1.1 Työn tausta

Etenevä ilmastonmuutos on aiheuttanut tarpeen muuttaa globaalia energiajärjestelmää nopeasti. Myös Suomessa energiajärjestelmän voimakas sähköistyminen lisää sähkön käyttöä, kun valtio pyrkii hiilineutraaliksi vuonna 2035 (TEM 2021). Merkittävänä osana uutta energiajärjestelmää ovat vaihtelevat uusiutuvat energiantuotantomuodot. Isossa määrin energiajärjestelmään tuodut vaihtelevat sähköntuotantomuodot, kuten tuulivoima, aiheuttavat haasteita sähköverkon ylläpidolle, kun niiden säädettävyyks on perinteisiä tuotantomuotoja heikompi (Bessa et al. 2014). Fingrid (2021) varautuu nopean muutoksen tuomiin haasteisiin, mutta epävarmuustekijöitä on paljon.

Tulevaisuuden energiajärjestelmä on kompleksinen. Kang et al. (2020) tunnistivat 22 energian avainteknologiaa, joiden joukossa on kysyntäjousto. Myös Wang ja Tang (2017) nostavat rakennusten kysyntäjouston tärkeäksi työkaluksi tehotasapainon ylläpitämisessä tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Sähkön kysyntäjousto osallistumisesta maksetaan korvausta (Fingrid 2022a), joten kuluttajaa voi houkuttaa osallistumiseen liittyvä tulonlähde. Myös osallistuminen päästöjen vähentämiseen voi houkuttaa kiinteistönomistajaa (Järventausta et al. 2015).

Suomessa potentiaalia suurten kiinteistönomistajien osalta talotekniikan osallistumisesta kulutusjousto on satoja megawatteja (Järventausta et al. 2015). Lu et al. (2021) tunnistivat tutkimuksessaan tarpeen tutkia kulutusjouston vaikutusta rakennusten lämmitys-, ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmiin. He tutkivat mallinnuksen avulla muun muassa ilmanvaihtojärjestelmän palautumista kulutusjoustopyyntiin päätyttyä.

Kulutusjoustoos osallistuvan ilmanvaihtojärjestelmän vaikutusta kiinteistön paine-eroihin ei ole juurikaan tutkittu. Ylipäättään paine-erojen hallinta olemassa olevassa kiinteistökannassa on vielä kehittymässä. Lainsäädäntö ottaa kantaa rakennusten paine-eroihin epäsuorasti määrittämällä suunnitteluilmavirtoja (A 1009/2017). Kosteustekninen turvallisuus on kuitenkin huomioitava rakennuksen ylläpidossa. Merkittävä ylipaine ulkoilmaan nähden aiheuttaa riskin, että sisäilmassa oleva kosteus siirtyy rakenteisiin (Björkroth ja Eskola 2019). Kosteusriskin minimoimiseksi ilmanvaihtojärjestelmät suunnitellaan siten, etteivät lämpimät rakennusosat ole ylipaineisia ulkoilmaan nähden (Sisäilmayhdistys n.d.). Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan myös liian suuri alipaine aiheuttaa riskin epäpuhtauksista sisäilmassa. Tuomisen et al. (2019) tutkimuksessa huomattiin, että useissa suomalaisissa palvelurakennuksissa oli ilmanvaihdossa säätötarvetta, jotta paine-erot saataisi hallintaan. Rakennuksen käyttötarkoitus määrittää sen sisäilmaston tavoitteita. Rakennuksen laadukkailla rakenteilla yhdessä talotekniikan käytön ja säädön avulla luodaan hyvät edellytykset rakennuksen käytölle (Talotekniikkainfo 2021). Ihmiset viettävät nykyisin sisätiloissa paljon aikaa, joten hyvien sisäilmaolosuhteiden luominen on ihmisten hyvinvoinnin kannalta olennaista.

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena oli tunnistaa, aiheutuuko kulutusjoustoos liittyvälle kiinteistölle riskejä. Tutkimuskysymykset olivat:

- Onko ilmanvaihtokoneiden sähkön kulutusjoustoos osallistumisella vaikutusta kiinteistön rakennusvaipan yli mitattuihin paine-eroihin?
- Miten varmistetaan rakennustekninen turvallisuus, kun rakennuksen ilmanvaihto kytketään sähkön kulutusjoustoos ja mitä taloteknisesti tulee huomioida?

Sähkönkäyttöä ja kulutusjoustoos tutkitaan kiinteistöissä, joissa kulutusjoustoos osallistuvat kulutuskohteet ovat talotekniset laitteet, keskeisimpänä ilmanvaihtojärjestelmät. Tutkimuksen kohteena on sisäilmaolosuhteisiin vaikuttavista tekijöistä ja mitattavista suureista paineero rakennuksen ulkovaipan yli. Kulutusjoustoos liittyviä investointeja tai tuottoja ei käsitellä tässä työssä.

1.3 Työn rakenne

Työn ensimmäinen luku on johdantoluku. Teoriaosuus koostuu luvuista 2–3. Kirjallisuuskatsauksen avulla käsitellään tarvetta kulutusjoustolle ja kulutusjoustoja erityisesti kiinteistönomistajan näkökulmasta ja ilmanvaihdon käyttöä kulutusjoustolla (luku 2) sekä paineerojen muodostumista kiinteistöissä (luku 3). Paine-eroihin vaikuttavien tekijöiden lisäksi käsitellään sen vaikutuksia rakennuksiin, ja lisäksi paine-eron mittaamista. Luvussa 4 esitellään työn kohde ja mittausjärjestelyt. Luku 5 esittelee mittausten tulokset. Luku 6 on yhteenveto ja luvussa 7 esitellään jatkotutkimusaiheita.

2 Energiamurros, kysyntäjousto ja kulutusjousto

Tässä luvussa esitellään ilmastonmuutokseen varautumisen aiheuttamia muutoksia energiajärjestelmälle. Uusiutuvien vaihtelevien energiantuotantomuotojen sähköverkon ylläpidolle aiheuttama haaste esitellään ja ratkaisuista käsitellään tarkemmin yhtä, kysyntäjoustoja. Kysyntäjoustoja sähkön loppukäyttäjän näkökulmasta käsiteltäessä käytetään terminä kulutusjoustoja.

2.1 Energiamurros ja sähkönkäyttö

Sähköjärjestelmä kohtaa useita haasteita energiajärjestelmän nopeassa muutoksessa. Vaihtelevan uusiutuvan energiantuotannon osuus kasvaa myös Suomessa voimakkaasti (Fingrid 2018). Samanaikaisesti energiajärjestelmät sähköistyvät ja sähkön käyttö lisääntyy. Sähköverkon on oltava tasapainossa jokaisella ajanhetkellä, eli tuotannon ja kulutuksen tulee olla samansuuruiset. Tuotantorakenteen muuttuessa sähköverkon pullonkaulojen riski kuitenkin kasvaa. (Bessa et al. 2019.)

Kun suuri määrä vaihtelevia uusiutuvia sähköntuotantomuotoja tuodaan osaksi sähköjärjestelmää, lisääntyy tuotannon ajallinen vaihtelu ja epävarmuus perinteisiin säädettäviin tuotantomuotoihin verrattuna. Lisäksi tuulisähkön tuotannon ennustaminen tarkasti on haasteellista ja säätömahdollisuudet ovat perinteisiin voimalaitoksiin verrattuna pienet. Jos tuotantoa joudutaan supistamaan, se alentaa laitosten kapasiteettitehokkuutta ja vähentää uusiutuvan energiantuotannon osuutta sekä investointien kannattavuutta. Tästä syystä on tärkeää miettiä sähköverkon joustavuutta ensisijaisesti muita keinoja käyttämällä. (Bessa et al. 2019.)

Sähköverkkoon suoraan kytketyt pyörivät massat tarjoavat inertiaa, kun ne häiriön tullessa pyrkivät jatkamaan pyörimistä samalla taajuudella. Ne siis vastustavat taajuuden muutoksia. Sähköverkko on herkempi häiriöille, kun inertiaa on vähemmän. Perinteisissä sähköntuotantomuodoissa on paljon suoraan sähköverkkoon kytköksissä olevaa pyörivää massaa, mutta uusiutuvien vaihtelevien sähköntuotantomuotojen kohdalla näin ei ole. Inertian pieneneminen sähköverkossa herkistää taajuuden nopeille vaihteluille ja tekee hallinnan haastavammaksi. (Fingrid 2018.)

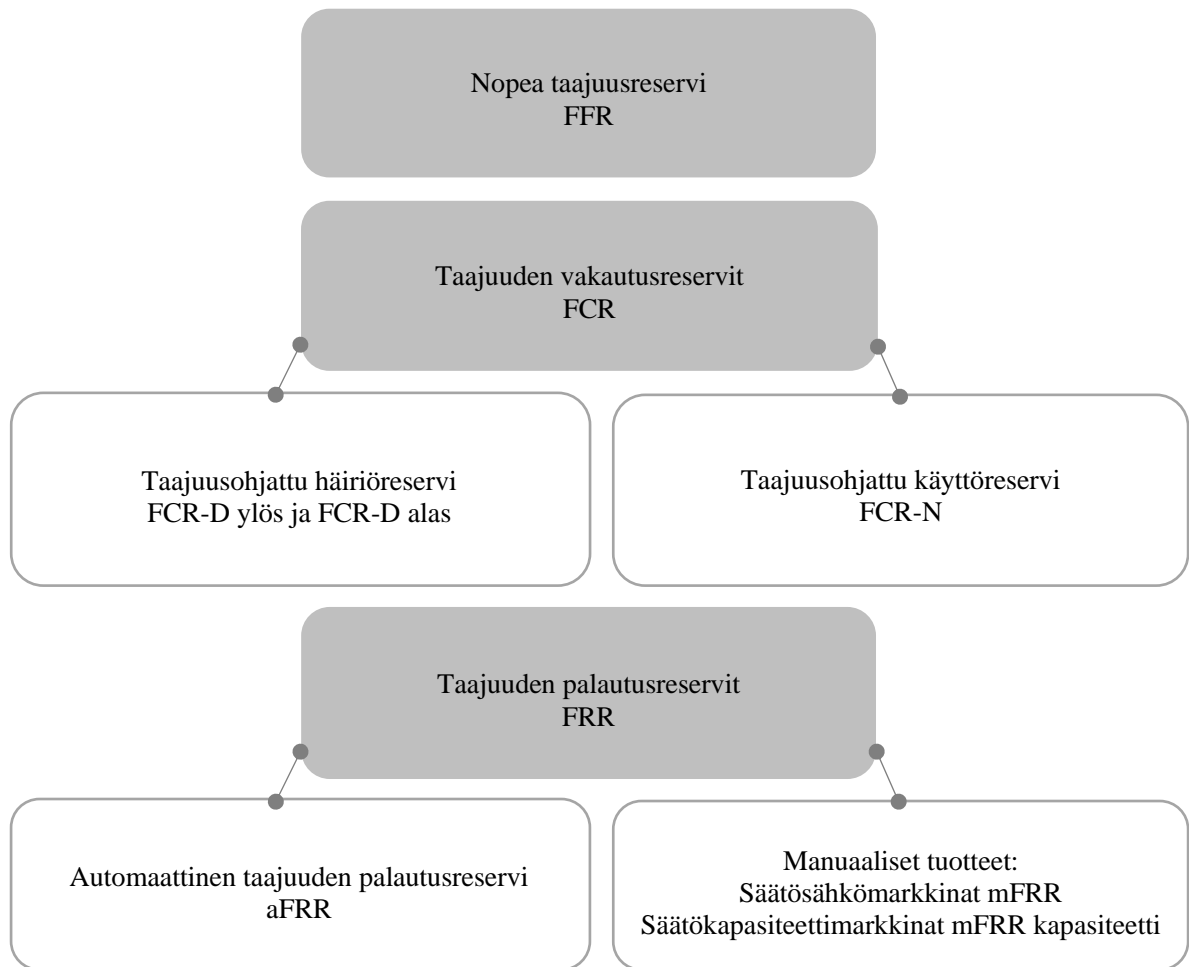
Bessa et al. (2019) ovat todenneet, että sähkön siirtovarmuuden on pysyttävä myös energiamurroksessa korkealla tasolla. Matalan inertian tilanteissa taajuuden laskiessa häiriön vuoksi voi seurauksena olla kuorman automaattisia irtikytkentöjä tai jopa sähkökatkoja (Bikdeli et al. 2022). Heikon inertian tilanteisiin Fingridillä (2022b) on vuodesta 2020 lähtien ollut nopeaa taajuusreserviä, joka on muita reservituotteita nopeampi käyttöönottaa.

Edellä esitettyihin haasteisiin on keinot vastata, mutta se halutaan tehdä taloudellisesti kannattavimmalla tavalla. Verkkojen vahvistaminen ja energian varastointi ovat tapoja tasata tuotannon ja kulutuksen ajallista eroa, mutta esimerkiksi sähkön varastointi on toistaiseksi kallista (Bessa et al. 2019). Sähkömarkkinoilla on tarve jatkuvaan kehittymiseen energiamurroksen edetessä ja tuotantorakenteen muuttuessa. Fingridin (2022c) tavoitteena on tulevaisuudessa palkita joustavuudesta sekä tuotannon että kulutuksen puolella ja mahdollistaa kaiken jouston pääseminen markkinoille.

2.2 Sähkömarkkina Suomessa

Sähkön tuotanto ja myynti on vapautettu kilpailulle. Sähkön hinta määräytyy markkinoiden perusteella, ja sähkömarkkinoilla on useita markkinapaikkoja. Suomen energiamarkkinat ovat kytkeytyneet muiden maiden markkinoihin, mutta Suomi on oma tarjousalueensa. Sähkökauppaa voidaan käydä johdannaistuotteilla jo kauan ennen fyysistä sähkön toimitusta. Varsinainen sähkökauppa käydään vuorokausimarkkinalla, jossa vuorokauden jokaiselle tunnille muodostuu oma hinta tarjousten perusteella. Myös siirtokapasiteetit hinta-alueiden kesken vaikuttavat hinnanmuodostukseen (Fingrid n.d.a.) Tarkastelujakso on nykyisellään tunti, mutta vaiheittainen siirto varttitaseseen on tulossa, alkaen taseselvityksistä vuonna 2023 (Fingrid 2022d).

Aina kulutus ja tuotanto eivät vastaa ennustettua. Koska tarkka sähkön käytön ennustaminen on haastavaa esimerkiksi sääolojen tai yllättävien laiterikkojen takia, sähkökauppaa voi käydä myös päivänsisäisillä markkinoilla. Varsinaisen sähköenergian kaupan lisäksi osana sähkömarkkinajärjestelmää on myös säätösähkö- ja reservimarkkinat. (Fingrid n.d.a.) Reservimarkkinatuotteet ovat näkyvissä kuvassa 1.



Kuva 1. Reservimarkkinat ja tuotteet

2.3 Säättösähkö- ja reservimarkkinat

Tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino on ylläpidettävä jatkuvasti jokaisella ajanhetkellä, ja vastuu tästä tasehallinnasta on kantaverkonhaltijoilla (Fingrid n.d.b.). Reservitoimija muuttaa tuotantoaan tai kulutustaan sovitun mukaisesti, ja se voi olla tuotantolaitos, kuluttaja tai energiavarasto. Reservituotteiden käyttötarkoitukseen on Suomessa kaksi vaihtoehtoa: taajuudenvakautus tai taajuuden palautus. Taajuudenvakautusta käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Taajuudenpalautusreservi pystyy palauttamaan 0,5 Hz poikkeaman nimellistaajuudesta häiriön, kuten ison kulutus- tai tuotantolaitoksen pudotessa verkosta. Kun taajuudenpalautusreservistä otetaan säätöä käyttöön, voidaan vapauttaa aikaisemmin käyttöön otettua taajuudenvakautusreserviä. (Fingrid 2022b.)

Fingrid Suomen kantaverkonhaltijana ylläpitää muiden pohjoismaisten kantaverkkotoimijoiden kanssa säätöenergiamarkkinoita mFRR (manual Frequency Restoration Reserves) sähköverkon tehotasapainon ylläpitämiseksi. Säätösähkömarkkinoilla tarjouksia voi jättää jatkuvasti, kuitenkin viimeistään 45 minuuttia ennen kaupankäynnin kohteena olevan käytötunnin alkamista. Säätösähkömarkkinoiden tarjouksia toteutetaan Fingridin pyynnön mukaan tarvittaessa. (Fingrid n.d.a.) Säätösähkömarkkinoiden minimikapasiteetti on yleisesti 5 MW ja muutoksen tulee tapahtua 15 minuutin kuluessa pyynnistä. Tarjous on ylös- tai alassäätötarjous. Markkinalle osallistumiseen tarvitaan erillinen säätösähkömarkkinasopimus Fingridin kanssa. (Fingrid n.d.c.)

Säätökapasiteettimarkkinalle osallistuva toimija lupautuu siihen, että hän jättää tietyn määrän tarjouksia edellä kuvatulle säätösähkömarkkinalle, ja hyvityksenä tästä on kapasiteettikorvaus. Säätökapasiteettimarkkinalle hyväksytyt tarjoukset tehnyt toimija jättää tarjoukset säätösähkömarkkinalle edellisenä päivänä. Myös säätökapasiteettimarkkinassa vaaditaan säätösähkömarkkinasopimus Fingridin kanssa. Tavoitteena on jatkossa, että pohjoismaisesta säätösähkömarkkinasta siirrytään kohti eurooppalaista markkinaa. (Fingrid n.d.c.) Tätä työtä kirjoittaessa säätökapasiteettimarkkinat ovat uudistumassa (Fingrid 2022e).

Taajuuden palautusreserviä on myös automaattista, aFRR. Sitä tilataan etukäteen vain osalle vuorokauden tunneista, joilla on usein ollut taajuusvaihteluita. Markkinalle tarjottavan säädön kapasiteetin tulee olla vähintään 1 MW:n suuruinen ja sen tulee aktivoitua todennetusti 5 minuutin sisällä pyynnöstä. Fingrid toimittaa tehonmuutossignaalipyynnön kyseiselle tunnille hyväksytyille reserville 10 sekunnin välein. Myös aFRR-markkinaan on suunnitteilla muutoksia, ja tavoitteena on yhteiset pohjoismaiset markkinat (Fingrid 2022f.)

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR (Frequency Containment Reserve) on toiminnaltaan automaattinen taajuudenvakautusreservi, joka jaetaan taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) ja taajuusohjattuun häiriöreserviin (FCR-D). Niihin osallistuvat toimijat auttavat verkon jatkuvassa automaattisessa taajuudenhallinnassa ja niiden tulee osoittaa täyttävänsä Fingridin määrittelemät tekniset vaatimukset. Tarjouksia voi tehdä joko koko vuodeksi, tai osallistua tuntimarkkinalle. Fingrid voi ottaa kapasiteettia taajuusohjattuun reserviin myös muista Pohjoismaista tai Virosta siirtoyhteyksien kautta. (Fingrid 2022g.)

Taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N toimii siten, että tavoitteena on pysyä taajuusalueella 49,9–50,1 Hz. Käyttöreserviin tulee ilmoittautua tuotannolla tai kuormalla, jota voidaan säätää symmetrisesti molempiin suuntiin yhtä suuren osan. Kun taajuus on liian suuri, pyydetään alassäätöä, joka on joko tuotannon vähentämistä tai kulutuksen lisäämistä. Kun taajuus on liian alhainen, pyydetään ylössäätöä, mikä tarkoittaa joko tuotannon lisäämistä tai kulutuksen pienentämistä. Teknisenä vaatimuksena osallistuvan tuotannon tai kuorman säätöportaan tulee olla 0,1 MW, ja aktivoitumisen tulee tapahtua askelittain kolmen minuutin kuluessa koko tarjotulla kuormalla. FCR-D eli taajuusohjattu häiriöreservi puolestaan reagoi siten, että palaudutaan taajuusalueelle 49,5–50,5 Hz. Häiriöreserviin voi tehdä tarjouksen ylös- tai alassäädöstä erikseen, eikä symmetrisyyden vaatimusta ole. Teknisenä vaatimuksena taajuusohjatussa häiriöreservissä on 1 MW:n säätöporras, ja aktivoitumisaikavaatimus muodostuu kuorman suuruuden ja taajuuden mukaan. (Fingrid 2022g.)

2.4 Kysyntäjousto säätösähkö- ja reservimarkkinoilla

Fingridin (2022d) mukaan tavoitteena tulevaisuudessa on joustavammat ja reaaliaikaisemmat sähkömarkkinat ja parantaa kysyntäjoustop sekä älykkään sähköverkon toimintamahdollisuuksia. Yhtenä joustavuutta lisäävänä ratkaisuna on kysyntäjousto. Lu et al. (2021) ovat todenneet, että tutkimuskentässä kiinnostus kysyntäjoustoos osana taajuussäätöä on nousussa. Fingridillä (2022a) kysyntäjoustop pilotointi on alkanut jo vuonna 2014 ja esimerkiksi energiaintensiivinen teollisuus on osallistunut tehonsäätöön kulutusta säätämällä jo aikaisemmin.

Kysyntäjoustopkuormalla voi osallistua säätösähkö- tai reservimarkkinoille ja vaatimus resurssien joustavuudesta ja nopeudesta nostaa todennäköisesti entisestään automatisoinnin tarvetta (Fingrid 2022a). Myös reservimarkkinalla siirrytään tulevaisuudessa varttitaseeseen, jolloin tarjouksetkin voi jättää tunnin sijaan varttitunnille kerrallaan. Säätösähkömarkkinoiden tarjoustopkoko myös pienenee mahdollistaen pienempien toimijoiden osallistumisen markkinalle, mikä mahdollistaa myös kysyntäjoustoplla pienemmällä kuormalla osallistumisen. (Fingrid 2022d.) Fingridin (2022g) mukaan taajuusohjattuun reservimarkkinaan voi osallistua kysyntäjoustoplla siten, että ylössäätöpyyntiin osallistutaan kuormaa pienentämällä ja alassäätöön osallistutaan kulutusta suurentamalla. Kysyntäjoustopoa oli vuoden 2022 alussa

taajuusohjatussa käyttöreservissä 10 MW ja taajuusohjatussa häiriöreservissä ylössäätöä 410 MW ja alassäätöä 30 MW (Fingrid 2022a).

2.5 Kulutusjousto kiinteistön omistajan näkökulmasta

Kun kysyntäjousto tarkastellaan sähkökäyttäjän näkökulmasta, käytetään terminä Motivan (2022) mukaan myös kulutusjousto. Tässä työssä keskitytään kiinteistönomistajan näkökulmaan ja käytetään jatkossa termiä kulutusjousto. Kulutusjousto osallistumiseen voi kiinteistönomistajaa motivoida maksettava korvaus tai mahdollisuus osallistua energiantuotannon päästöjen vähentämiseen. Lun (2012) mukaan kiinteistönomistajan on mahdollista saada merkittäviä tuottoja taloteknisten laitteiden osallistumisesta kulutusjoustoille. Vrettosin et al. (2016) mukaan kulutusjousto on mahdollista kytkeä taloteknisiä laitteita, kuten lämmitystä, jäähdytystä ja ilmanvaihtokoneita heikentämättä olosuhteita.

Ollakseen vaikuttavaa kysyntäjoustoilla tulee olla riittävä tehoalue, jolla ylös- tai alassäätöä tehdään. Pienkuormilla on mahdollista osallistua markkinoille aggregaattorin avulla. Aggregaattori on toimija, joka kokoaa yhteen useita pienempiä kuormia eri omistajilta kulutusjoustokäyttöön, ja osallistuu markkinaan yhdistetyllä kuormalla (Fingrid 2022a.) Fingridin (2017) tavoitteena on luoda yhteispohjoismaiset säännöt aggregoinnille.

Lun (2012) mukaan kulutusjousto osallistuminen vaatii säädettävien kuormien älykästä kommunikaatiota sähköverkon kanssa. Aggregointimalleja on erilaisia ja eri järjestelmiä voidaan valita mukaan kulutusjousto. Esimerkkinä Lu (2012) esittelee tilalämmityksen, ilmanvaihdon ja jäähdytyksen kuormien osallistumista kulutusjousto sähkölämmitteisessä kohteessa säätämällä kuormia pois ja päälle. Fingrid (2022a) on tutkinut muun muassa kotien sähkölämmityksen ja kaupallisten varavoimajärjestelmien kytkemistä kulutusjousto markkinaan. Aggregaattori koostaa useista laitteista virtuaalivoimalaitoksen ja määrittää tehonpyynnin eri laitteille markkinoiden tarpeen mukaan (Wu et al. 2018).

Hyviä ominaisuuksia Lun (2012) mukaan aggregointiin liitetyille lämpötilasäädetyille laitteille ovat jatkuvakäyttöisyys, sekä riittävä tehonsäätöalue kullakin laitteella ja esimerkiksi lämpötilan sallitun välin riittävä suuruus. Tällaisten laitteiden säätöä voidaan toteuttaa eri ajanhetkillä, ja säädettävä teho on riittävän suuri, eikä laitteiden määrä kasva liian suureksi.

Mitä suurempi sallittu lämpötilanvaihtelu on, sen suurempi on lämmitykseen tai jäähdytykseen kytketty kulutusjouston tehopotentiali. Wu et al. (2018) huomauttavat, että tilojen lämpötila-asetuksissa voi olla hyödyllistä hieman joustaa, jotta taajuussäätöön osallistuminen onnistuu. Kulutusjoustoan kytketyn laitteen osalta tulee välttää jatkuvaa päälle ja pois kytkentää. Wu et al. (2018) esittelevät myös menetelmän, jolla jatkuvasti muuttuvaa säätöä voidaan välttää, kun yksittäiselle laitteelle asetetun tilan täytyy pysyä tietty minimiaika.

2.6 Kulutusjousto ilmanvaihdossa

Kulutusjoustokäytössä ilmanvaihtokoneiden tehoa säädetään normaalitasosta ylös- tai alaspäin pyynnin mukaisesti. Ilmanvaihdon yhteydessä voi olla myös jäähdytys- ja lämmityslaitteita, jotka voivat olla sähkökäyttöisiä, jolloin myös ne vaikuttavat järjestelmän sähkötehoon. Mitä suurempi osuus tilojen lämmityksestä tai jäähdytyksestä on osana ilmanvaihtojärjestelmää, sitä enemmän säädöt vaikuttavat tilojen olosuhteisiin. Lämpötilarajat ja hiilidioksidin yläraja voivat rajoittaa ilmanvaihdossa kulutusjoustoan käytettävissä olevaa tehoa. Ilmanvaihdon tehontarve riippuu todellisuudessa käyttäjämääristä tiloissa.

Lun et al. (2021) mukaan ilmanvaihtokoneiden puhaltimien käyttäminen sähköverkon taajuussäätöön on taloteknisistä laitteistoista tutkimuskohteena noussut suosituksi ja kulutusjouston vaikutusta ilmanvaihdossa on tutkittu erityisesti lämpötilan jakautumisen ja energiankäytön näkökulmasta. Lu (2012) muistuttaa, että joustopotentiali rakennuksissa vaihtelee esimerkiksi ulkolämpötilan vaihdella ja muuttaessa rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeita, ja eri rakennuksissa potentiali muuttuu eri tavoin.

Maasoumy et al. (2014a) ovat todenneet, että ilmanvaihtojärjestelmät ovat hyvä kuorma kulutusjoustoan esimerkiksi siksi, että säätöä on mahdollista tehdä ylös- ja alaspäin. Esimerkiksi FCR-N markkinalla säädettävä kapasiteetti on tarjottava symmetrisesti, kuten luvussa 2.3 mainittiin. Toisaalta Vrettosin et al. (2018) mukaan symmetrisyysvaatimus voi vaikuttaa tarjottavan kapasiteetin määrää pienentävästi. Heidän tutkimuksessaan tilajäähdytyksessä käytettävä ilmanvaihtojärjestelmä osallistui kulutusjoustoan, ja puhallintehoa muutettiin pyynnin mukaan. Heidän tutkimuksessaan koneiden kulutusjoustoan liitettävissä oleva kapasiteetti vaihteli sen mukaan, onko markkinalla symmetrisyysvaatimus, sallittiinko yöllä suuremman lämpötilan vaihtelut ja oliko tutkimushetkellä talvi- vai kesäkelä.

Ilmanvaihtojärjestelmän normaali tehotaso vaikuttaa käytössä olevaan kapasiteettiin, samoin ilmanvaihtojärjestelmän toimiminen osana tilojen lämmitystä ja jäähdytystä. Lun et al. (2021) tutkimuksessa viileämissä ilmastoissa kulutusjoustoön käytettävissä olevat ilmanvaihtokoneiden kapasiteetit olivat lämpimämmän ilmaston verrokkeja hieman pienempiä, koska viileämpien ilmastojen kohteissa normaali tehotaso oli alhaisempi, ja tällöin säätövara alaspäin oli vähemmän. Lämpimämissä ilmastoissa puhallintehoa tarvittiin erityisesti kesällä jäähdytystarpeen ollessa korkea.

Käyttäjien olosuhteet täytyy huomioida myös kulutusjoustoön kytketyssä kohteessa. Kun kulutusjoustoön liitettyä kapasiteettia ilmanvaihtokonekohtaisesti kasvatetaan, ilmamäärän vaihtelu kulutusjoustopyyntien aikana kasvaa. Lun et al. (2021) simulaatiossa tutkittiin erilaisissa ilmastoissa sijaitsevia ilmapirtasäätöisiä ilmanvaihtojärjestelmiä, joissa lämmitys ja jäähdytys olivat puhaltimen lisäksi sähkötoimisia. Kulutusjoustoön maksimimuutos puhallintehoon vaihteli 5–20 %. Ilmanvaihtojärjestelmän tehon muutos seurasi hyvin kulutusjoustoön pyyntiä. 5 %:n tehonmuutoksella ilmamäärä muuttui 8 %, kun taas 20 %:n tehonmuutoksella ilmamäärä muuttui jo 53 %. Ilmamäärän muutos ei ole lineaarinen puhallintehon muutoksen suhteen. Tutkimuksessa ilmamäärien vaihtelu vaikutti tuloilman lämpötilaan. Mitä suurempi osuus puhallintehosta oli kulutusjoustoön kytketty, sitä suurempi vaihtelu tuloilman lämpötilassa oli, mutta 45 minuutin kulutusjoustojakson aikana vaikutus sisätilojen lämpötiloihin jäi tutkimuksessa pieneksi.

Wang ja Tang (2017) tutkivat ilmanvaihtojärjestelmää, joka palveli myös tilojen jäähdytystä. Tutkimuksen mukaan puhallintehoa rajoitettaessa kulutusjoustoön osallistumisen vuoksi kohteessa, jossa on tilakohtainen säätö, voi seurauksena olla hyvin erilaiset lämpötilat eri tiloissa. Maasoumy et al. (2014b) määrittivät, että täysi joustopotentiaali puhallimelle tarjotaan silloin, kun vaikutusalueen lämpötila on tavoitteessaan, ja pienenee kun lämpötila nousee tai laskee lähelle hyväksyttäviä rajoja. Heidän algoritmissaan myös tarjotun palkkion hinta vaikuttaa ohjauksiin, eli suuremmalla palkkiolla sallitaan hieman suurempi jousto. Tutkimuksessa pidettiin jopa tunnin yhtäjaksoinen muutos puhallintehoihin rikkomatta lämpötilarajoja, mutta esimerkiksi hiilidioksidipitoisuutta ei otettu huomioon.

Lun et al. (2021) mukaan kulutusjoustosta ilmanvaihdossa on tutkimustuloksia, joissa energiatehokkuus paranee, ja sellaisia, joissa energiankulutus kasvaa. Beilin et al. (2015)

tutkimuksessa oli useita ilmanvaihtokoneita, joissa oli tilakohtainen ilmamäärän säätö ja tuulilmaa jäähdytettiin. Jäähdytystarpeen kasvaessa ilmamäärää kasvatettiin. Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että tällä kohteella energiatehokkuus laski kulutusjoustopuolelta. Lu et al. (2021) tutkivat useita tapauksia, joista kaikissa kaikkia alassäätöpyyntejä ei pystytty toteuttamaan halutun suuruisena esimerkiksi moottorin minimikierronopeuden takia. Tällä voi myös olla kulutusjoustopuolelta olevalle ilmanvaihtojärjestelmälle energiankulutusta lisäävä vaikutus, kun kulutusjoustopuolelta ylössäädöt toteutetaan, mutta kaikkia alassäätöjä ei, jolloin kokonaisenergiankulutus puhaltimella kasvaa perustasoon nähden. Kokonaisenergiankulutus nousi yhdessä tutkitussa tapauksessa 7 % perustasoon verrattuna.

Vaikutuksia voi energiatehokkuuden muutoksen lisäksi olla myös suoraan ennakoimattomina kulutuspiikkeinä. Lun et al. (2021) tutkimuksessa suurella jäähdytyskuormalla nousi ongelmaksi se, että 45 minuutin kulutusjoustopuolelta päätyttyä jäähdytys- ja puhallintehon tarve oli noussut suureksi. Tutkimuksessa kulutusjoustopuolelta järjestelmä ei antanut jäähdytystä tarpeeksi. Kulutusjoustopuolelta päätyttyä kohteen tehontarve nousi suureksi, ja tällaisella tehopiikillä voi kirjoittajien mukaan olla jopa negatiivinen vaikutus sähköverkolle.

Ilmanvaihto on parhaimmillaan nopeasti muuttuva kuorma käytettäväksi kulutusjoustopuolelta. Maasoumy et al. (2014a) ovat todenneet, että ilmanvaihtojärjestelmissä puhallinteho on nopeasti, jopa sekunneissa reagoiva kuorma, kunhan kiinteistön ilmanvaihtokoneilla on taajuusmuuttajat, joita voidaan ohjata automaation avulla. Maasoumy et al. (2014b) tutkimuksessa puhallinteho vaihteli ± 25 % nimellistehosta jopa muutamassa sekunnissa. Beilin et al. (2015) tutkimuksessa kanavapaineohjatun puhaltimen teho reagoi selvästi nopeammin muutospuolelta kuin jäähdytyslaitteiston kompressorikuorma, mutta toisaalta hitaammin kuin taajuudensäätökäytössä olevat sähköakut ja vauhtipyörät. Ilmanvaihtokoneen puhaltimen tehon muutoksen nopeus riippuu kuitenkin kunkin puhaltimen säädöstä.

Liitettävän järjestelmän rajoitukset tulee aina ottaa huomioon, rajojen määrittelyssä tulee tuntea kohteen erityispiirteet, ja kulutusjoustopuolelta liitetyn puhallinkapasiteetin tulee olla oikein määriteltä. Lun et al. (2021) tutkimuksessa selvisi, että mikäli säädettävän kapasiteetin rajat määritellään liian löyhästi, voi taajuusmuuttajan minimitaso tulla vastaan, eikä pyydytystä kulutusjoustopuolelta pystytä toteuttamaan riittävän suuruisena. ABB:n (2022) mukaan liian matalilla nopeuksilla itsejäähdytteisen moottorin jäähdytysteho huononee, jolloin

lämpötila pääsee kasvamaan ja liian suurella teholla taas lämpötila voi nousta, jos moottorin oma kapasiteetti ylitetään. Myös Maasoumyn et al. (2014b) tutkimuksessa kapasiteettia rajoittava tekijä oli määritetyt puhallintehon suojarajat. Maasoumy et al. (2014a) suosittelevat säätämään kulutusjoustopyyntinä kanavapaineasetuksia puhallintehon sijaan, jotta turvarajoja ei ylitetä. Ilmanvaihtojärjestelmässä on tärkeää pitää painetaso oikeana eri osissa kanavistoa. Maasoumyn et al. (2014a) tutkimuksen mukaan on haasteellista pitää painetaso riittävänä eri osissa ilmanvaihtokanavistoa, kun ilmanvaihto on kytketty kulutusjousto.

Lu et al. (2021) huomauttavat, että kulutusjouston vaikutuksia ilmanvaihtojärjestelmän toiminnalle on syytä vielä tutkia. Aihetta on tutkittu useilla simulaatioilla, jotka eivät ota kaikkea huomioon ja ovat pääosin yksinkertaistettuja. Vrettos et al. (2016) muistuttavat, että ylimääräisestä säädöstä johtuvaa laitteiston mahdollista kulumista ei otettu heidän tutkimuksessaan huomioon. Muissakaan käsitellyissä tutkimuksissa kulumista ei ole mainittu, vaikka jatkuvat säädöt laitteilla vaikuttavat niiden käyttöikä.

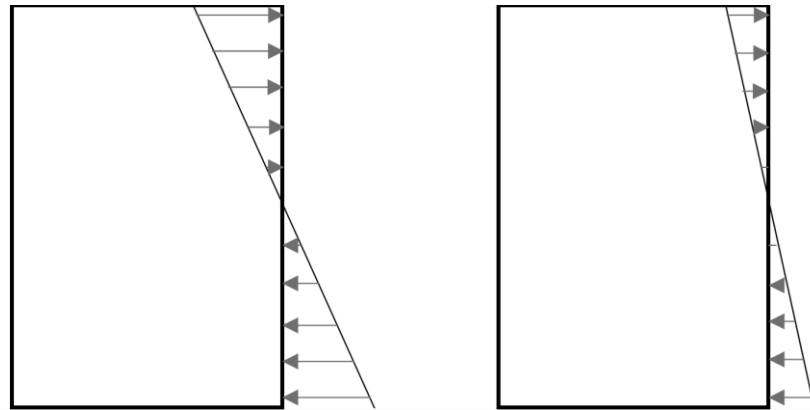
3 Kiinteistön paine-erot

Kiinteistön painesuhteet muodostuvat usean tekijän yhteisvaikutuksesta ja voivat vaihdella eri ajanhetkillä. Paine-eroa voi olla rakennusvaipan yli ja myös rakennuksen eri tilojen välillä. Paine-eroihin rakennuksessa vaikuttavat ulko-olosuhteet, rakenteet ja niiden tiiviys, rakennuksen käyttö sekä ilmanvaihdon toiminta. Ylipaineisesta rakennuksesta tai rakennusosasta ilma pyrkii poistumaan ulos ja alipaineiseen rakennukseen tai rakennusosaan ilma pyrkii virtaamaan ulkoa sisään. Yksittäisellä seinällä voi myös olla kohtia, joissa ilma pyrkii sisään ja toisessa kohti ulos (Pitkäranta 2016). Lisäksi rakennuksen ovien ja ikkunoiden avaaminen vaikuttaa paine-eroihin (Björkroth ja Eskola 2019).

3.1 Terminen paine-ero

Ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero vaikuttaa paine-eroihin. Kylmä ilma on lämpimämpää ilmaa tiheämpää. Hormi- eli savupiippuvaikutus eli terminen paine-ero syntyy tiiviiden rakennusosien yli, kun harvempi lämmin ilma pyrkii sisällä nousemaan ylöspäin. Mikäli paine-eroon vaikuttaisi pelkkä lämpötilaero, olisi talvella kuvan 2 mukaisen yksikerroksisen rakennuksen yläosa ylipaineinen ja alaosa alipaineinen ulkoilmaan nähden. Hormivaikutus kasvaa kylmällä säällä, eli lämpötilaeron kasvaessa. Neutraaliakseliksi kutsutaan kohtaa, jonka korkeudella paine-ero rakennusvaipan yli on 0 Pa. (Pitkäranta 2016.)

Kuvassa 2 on havainnollistettu pelkän hormivaikutuksen osuus paine-eroihin ja neutraaliakseli on pystysuunnassa keskellä. Rakennetta kohti osoittava nuoli kuvaa ylipainetta ja nuolen pituus ylipaineen suuruutta. Kuvassa vasemmanpuoleisessa tapauksessa lämpötilaero ulko- ja sisätilojen välillä on suurempi kuin oikeanpuoleisessa, jolloin myös hormivaikutus on suurempi. Rakennuksen sisällä alaosassa muodostuu alipaine, joka on suurin aivan alaosassa. Yläosassa rakennusta puolestaan muodostuu ylipaine, joka on suurimmillaan alakaaton rajassa.

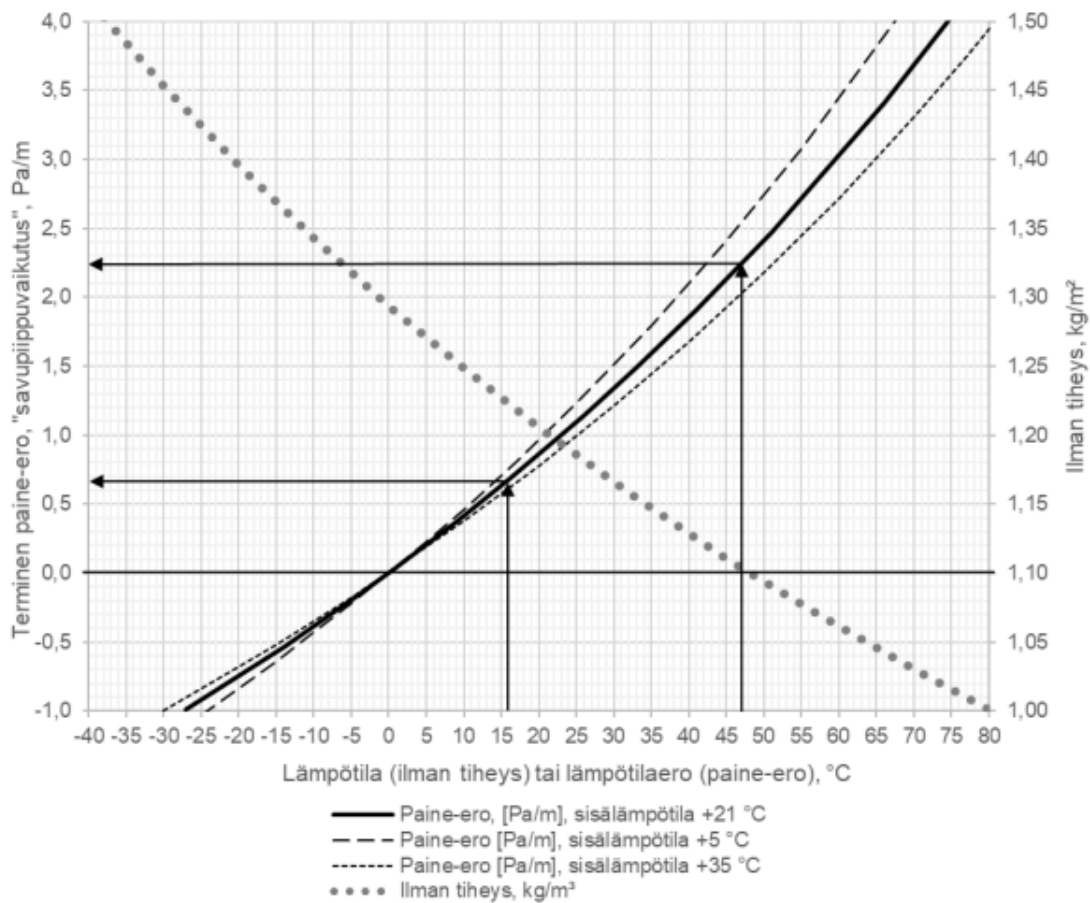


Kuva 2. Lämpötilaerojen vaikutus paine-eroon rakennusvaipan yli on havainnollistettu rakennuksen oikeanpuoleisen seinän yli kahdella eri lämpötilaerolla.

Myös rakennuksen korkeus ja erityisesti avoin porraskäytävä vaikuttavat hormivaikutuksen suuruuteen. Korkeassa tilassa muodostuu suurempi hormivaikutus. Tiivis porraskäytävä pienentää hormivaikutuksen suuruutta. Kylmällä säällä korkea rakennus voi olla yläosastaan ylipaineinen ulkoilmaan nähden, vaikka ilmanvaihto pyrki alipaineistamaan tiloja (Björkroth ja Eskola 2019.) Kuvasta 3 voidaan määrittää lämpötilaeron vaikutus ilman tiheyteen ja termisen paine-eron suuruus. Kuvasta voidaan määrittää, kuinka paljon paine muuttuu ilman tiheyden vaikutuksesta korkeuden suhteen eri ulkolämpötiloilla kolmella sisälämpötilalla.

3.2 Tuuli

Ulko-olosuhteista myös tuuli vaikuttaa rakennuksen paine-eroihin. Tuulensuunta vaikuttaa paine-erojen muodostumiseen, sillä tuulen osuessa kohtisuoraan rakennuksen seinään, se aiheuttaa kyseiseen pintaan ylipainetta ja rakenteen sisäpuolelle alipaineen ulkoilmaan nähden. Tuulenvastainen seinä, tuulensuuntaiset seinät sekä tasakatto puolestaan ovat alipaineisia. (Pitkäranta 2016.) Mitä suurempi tuulennopeus, sen suurempi on sen aiheuttama painevaikutus ja Björkrothin ja Eskolan (2021) mukaan jo 5 m/s mitatulla tuulennopeudella tuuli voi aiheuttaa jo 10 Pa suuruisen painevaikutuksen alimman kerroksen ulkoseiniin. Pitkäranta (2016) lisää, että tuulennopeuden ja -suunnan vaihtelut sekä muutokset ilmanvaihdossa voivat vaikuttaa paine-eroihin rakennuksessa hyvinkin nopeasti.



Kuva 3. Termisen paine-eron suuruus riippuu lämpötilaerosta (Björkroth ja Eskola 2021).

Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan rakennuksen sijainti vaikuttaa siihen, kuinka tuuliset olosuhteet ovat ja tuulenpaine voi korkeissa rakennuksissa olla yläosassa suurempi kuin alaosassa rakennusta. Pitkärannan (2016) mukaan ulkona olevat esteet voivat muuttaa tuulen vaikutusta rakennuksen paine-eroihin. Kun yleensä tuulen suuntainen rakennuksen seinä on ylipaineinen, niin merkittävän kokoinen este voi aiheuttaa jopa alipainetta tuulen suuntaan.

3.3 Rakenne ja tiiviys

Ulko-olosuhteiden lisäksi rakenteilla on suuri vaikutus muodostuviin paine-eroihin. Mitä epätiivimpi rakenne on, sitä enemmän ilmavuotoa rakennusvaipan yli pääsee muodostumaan. Rakenteiden epäjatkuvuuskohtat ja niiden sijainnit vaikuttavat rakennuksen paine-erojen muodostumiseen. Mikäli rakennuksen epätiivoin seinä on tuulenpuolella, voi tuuli aiheuttaa ylipaineen rakennuksen sisälle. Mikäli rakennuksen epätiivoin seinä on tuulen

suojapuolella, voi tuuli aiheuttaa rakennukseen taas alipaineen. (Pitkäranta 2016.) Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan samalla ilmavirralla tiiviimpään rakennukseen tulee suurempi alipaine, kuin vähemmän tiiviiseen, eli rakenteiden tiiviys vaikuttaa ilmanvaihdon aiheuttaman paine-eron suuruuteen. Mikäli rakennuksen ilmantiiveyttä parannetaan, myös tuulen ja hormivaikutuksen aiheuttamat ilmavirtaukset epäjatkuvuuskohtien läpi pienenevät (Björkroth et al. 2020). Mikäli rakennus ei ole tiivis, Björkrothin ja Eskolan (2021) mukaan alipaine jää pieneksi, vaikka pelkät erillispoistot ovat käynnissä.

3.4 Ilmanvaihto ja rakennuksen käyttö

Ilmanvaihto vaikuttaa muiden tekijöiden ohella myös rakennusten painesuhteisiin ja kosteustekniseen turvallisuuteen. Rakennuksen tai tilan ilmanvaihto on tasapainossa, kun tulo- ja poistupuolen kokonaisilmamäärät ovat yhtä suuret, ja tällöin ilmanvaihto ei aiheuta paineeroa rakennusvaipan yli. Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero muodostuu kaikkien tuloilmavirtojen summan ja kaikkien poistoilmavirtojen summan erotuksesta (Björkroth ja Eskola 2019) ja se vaihtelee rakennuksissa usein vuorokaudenaikojen mukaan (Pitkäranta 2016). Muutokset ilmanvaihdossa voivat vaikuttaa paine-eroihin rakennuksessa hyvinkin nopeasti (Pitkäranta 2016).

Painesuhteiden hallintaan vaikuttaa, onko rakennuksessa painovoimainen, poistoilmanvaihto, vai tulo-poistoilmanvaihto (Björkroth ja Eskola 2019). Ilmanvaihto voidaan toteuttaa vakioilmavirtaisena tai tarpeenmukaisena ohjauksena. Tarpeenmukaisessa ohjauksessa voidaan säätöperusteena ilmavirroille käyttää läsnäoloa, hiilidioksidipitoisuutta tai lämpötilaa, ja se voidaan toteuttaa joko tila- tai vyöhykekohtaisesti. Tarpeenmukaisesti ohjatussa ilmanvaihtojärjestelmässä puhaltimen teho säätyy palvelualueen kokonaisilmavirran tarpeen mukaan. (Sandberg ja Ripatti 2014, 126–127.) Puhaltimen taajuusmuuttajasäätö mahdollistaa portaattoman muuttuvailmavirtaisen säädön. Kaksinopeuspuhaltimilla, tehostuspelleillä tai erillisillä tehostuspuhaltimilla saadaan portaittain muuttuva ilmavirta. (Björkroth ja Eskola 2019.)

Kouluissa on usein tilavuutta kohden paljon käyttäjiä ja siten esimerkiksi hiilidioksidin tuottoa, ja tämän takia koulut vaativat tehokkaan ilmanvaihdon. Toinen opetustiloille tyypillinen ominaisuus on käyttäjämäärien suuri vaihtelu eri vuorokauden- ja vuodenaikoina. Näiden ominaisuuksien vuoksi tarpeenmukainen ilmanvaihto on erityisen hyödyllinen ratkaisu kouluissa. Tarpeenmukainen ohjaus tulee suunnitella huolella. (Jokinen et al. 2014, 334–340.) Käyttöaikana ja sen ulkopuolella ilmanvaihtoa on mahdollista ohjata eri tavoin. Hiljaisena aikana, kun käyttäjiä ei ole rakennuksessa, voidaan ilmanvaihtojärjestelmät ohjata seis, tai niitä voidaan käyttää joko osateholla tai jaksottaiskäytöllä siten, että ilmanvaihtokoneet ovat osan aikaa täysteholla ja osan aikaa seis. Alangon (2021) mukaan osatehokäyttöä hyödyntäessä tulisi kaikkien ilmanvaihtolaitteiden tehonsäädön olla portaaton. Jos talotekniikka on hyvin säädetty, osateho- ja jaksottaiskäytöllä ei ole eroa rakennuksen olosuhteisiin (Alanko 2021).

Tasapainoisiksi suunnitelluissa ilmanvaihtojärjestelmissä ilmamäärien muuttamisella tehon mukaan ei pitäisi olla vaikutusta paine-eroon, sillä tulo- ja poistoilmavirtojen on tarkoitus muuttua samassa suhteessa. Todellisuus voi kuitenkin olla toinen. Vaikka mittauksen ja säädön tarkkuus olisivat määräysten sallimissa rajoissa, ilmavirtojen mittauksen ja säädön epätarkkuus voivat aiheuttaa ennakoimattomia seurauksia tilojen painesuhteisiin. Mittaustarkkuus varsinkin pienillä ilmavirroilla on heikko. Mikäli tuloilmavirran mittaus näyttää todellista pienempää, tuloilmavirta on suunniteltua suurempi, ja jos yhtäaikaisesti poistoilmavirta on mittauserätarkkuuden takia suunniteltua pienempää, voi alipaineiseksi suunniteltu tila jopa ylipaineistua. (Björkroth ja Eskola 2019.)

Mitä tiiviimpi rakennus on kyseessä, sitä tarkempi tulee Vinhan et al. (2009) mukaan ilmanvaihdon tasapainotuksessa olla. Ilmanvuotoluku n_{50} kuvaa, kuinka paljon vuotoilmavirtaa virtaa tunnin aikana suhteessa rakennuksen tilavuuteen sisä- ja ulkoilman välisellä paineerolla 50 Pa (Björkroth ja Eskola 2019). Taulukko 1 näyttää, kuinka tiiveys vaikuttaa tasapainotuksen tärkeyteen. Hataralla rakennuksella, jonka ilmanvuotoluku n_{50} on korkea, ei tulo- ja poistoilman suhteiden vaihtelu vaikuta paine-eroihin juurikaan. Kun kyseessä on tiivis rakennus, ilmamäärän muutos tasapainotilanteesta muuttaa paine-eroa huomattavasti. Tiiviissä rakennuksessa 15 % pienempi tuloilmamäärä aiheuttaa kymmenien pascalien alipaineen, kun taas 15 % suurempi tuloilmamäärä aiheuttaa jo merkittävää ylipainetta.

Taulukko 1. Paine-erojen muodostuminen erilaisissa tulo-poistoilmanvaihdolla varustetuissa pientaloissa ilmamäärien tasapainon muuttuessa (Vinha et al. 2010).

	Tiivis rakennus $n_{50} = 0,15 \text{ 1/h}$	Erittäin hatara rakennus $n_{50} = 10 \text{ 1/h}$
15 % vähemmän tuloilmaa	-33...-22 Pa	-6...+4 Pa
Tasapainoinen	-7...+4 Pa	-6...+4 Pa
15 % enemmän tuloilmaa	+15...+26 Pa	-5...+4 Pa

Björkroth et al. (2020) ovat todenneet, että samalla kun rakennusten tiiviys on parantunut, ilmanvaihtojärjestelmien mittaustarkkuudessa ei ole tapahtunut riittävää parannusta, ja edelleen tilakohtaisesti tarkkuusvaatimus on ± 20 % ilmamäärästä. Mikäli ilmamäärät säädetään pelkkien ilmavirtamittausten perusteella, voi ilmanvaihtojärjestelmän epätasapaino jäädä kirjoittajien mukaan suureksi. Mittausepä-tarkkuus voi johtaa tiiviissä rakennuksissa suuriinkin huonekohtaisiin tulo- ja poistoilman epätasapainoihin, ja jopa -30 Pa alipaineeseen tai yli +15 Pa ylipaineeseen. (Björkroth et al. 2020.)

Ilmanvaihdon huolellinen säätö on tärkeää painesuhteiden hallinnassa, muutoin rakennus voi esimerkiksi ylipaineistua hetkellisesti, kuten kävi eräällä kohteella Alango (2018) tutkimuksessa. Syyksi Alanko arveli, että tulo- ja poistokoneiden viiveet eivät olleet yhteensopivan pituiset, ja aiheuttivat rakennuksen hetkellisen ylipaineistumisen koneiden käynnistyessä. Toisella kohteella käynnistysviiveiden erot taas aiheuttivat jaksottaiskäytöllä suurempaa alipainetta hetkellisesti käynnistyessä. Käynnistysviiveet onkin syytä asetella puhaltimille huolellisesti. Paine-eromittaukset auttavat määrittämään, ovatko ilmanvaihtojärjestelmän säädöt kunnossa (Björkroth ja Eskola 2019).

Björkrothin et al. (2020) mukaan paine-eroja ei enää voikaan hallita pelkästään ilmavirtamittausten perusteella, sillä ne eivät ole tarpeeksi tarkkoja painesuhteiden kokonaisvaltaisessa hallinnassa. Kirjoittajat suosittelevatkin jatkossa ilmavirtojen perussäädön jälkeen paine-erojen mittausta ja hienosäädön tekemistä ilmanvaihdon säätöihin paine-eromittausten tulosten perusteella. Mikäli paine-eromittauksista löytyy jotain säädettävää, Björkroth ja Eskola (2019) suosittelevat konsultoimaan suunnittelijaa. Alanko (2021) muistuttaa, että ilmanvaihto tulee säätää myös hiljaiselle ajalle siten, että erot käyttöajoissa eivät vaikuta paine-eroihin. Myös kun ikääntyneitä rakennuksia korjataan, tulee korjausrakentamisessa ottaa huomioon vaikutukset tiiveyteen ja siten painesuhteisiin. Pitkärannan (2016) mukaan

tiiviykskorjausten jälkeen ilmanvaihto tulee tasapainottaa ja Valvira (2018) ohjeistaa, että koneellisen ilmanvaihdon säädöt on aina tarkistettava tiiviykskorjauksen jälkeen.

Björkroth ja Eskola (2019) ovat todenneet, että jos rakennuksessa on kohdepoistoja, joiden korvausilmasta ei ole huolehdittu, voi niiden käyttö vaikuttaa painesuhteisiin arvaamattomasti. Pitkäranta (2016) muistuttaa, että ilmanvaihdolla ei tule aiheuttaa tilannetta, että sisätilat ovat alipaineisia alapohjaan nähden. Likaisten tilojen kannattaa kuitenkin olla alipaineisia muihin sisätiloihin nähden (Pitkäranta 2016).

Björkroth ja Eskola (2019) muistuttavat, että tiiviissä rakennuksissa erillispoistojen vaikutus paine-eroon rakennuksen ulkovaipan yli on pakko huomioida, jos ne ovat käynnissä koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon käyntiaikojen ulkopuolella. Alanko (2021) kirjoittaa, että jos käyttöaikojen ulkopuolella rakennuksen ilmanvaihto on jaksottaiskäytöllä, tulee myös erillispoistot tietyin varauksin sammuttaa muiden ilmanvaihtolaitteiden ollessa ohjattuna seis, pois lukien tilat, joissa on riski, epäpuhtaus- tai kosteuskuormia, kuten alapohjat tai hissikuilut.

Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan nykyään rakentamisessa pyritään huomioimaan erillispoistojen tarvitsema korvausilma, mutta ratkaisut eivät heidän mielestään ole vielä riittävän hyviä huomioimaan ja pitämään paine-eron tasaisena, vaan ilmavirrat joko eivät ole tiedossa, on arvioitu virheellisesti tai muuttuvat. COMBI-hankkeessa vuosina 2015–2018 Tuominen et al. (2019) tutkivat suomalaisten palvelurakennusten paine-eroja rakennusvaipan yli, ja valtaosa merkittävästä alipaineisuudesta johtui kohteilla siitä, että erillispoistot jäivät käyttöajan ulkopuolella käyntiin, kun pääilmanvaihto sammutettiin. Tutkimuksessa useilla kohteilla havaittiin ylipaineisuutta taas nimenomaan käyttöaikana. Säännönmukaisesti ilmavirtoja ei myöskään säädetä osateholla.

Monenlaiset virheet automaation ohjauksissa ilmanvaihtoon liittyen voivat myös vaikuttaa paine-eroihin. Alangon (2018) tutkimuksessa painesuhteita väärin esimerkiksi erillispoisto, joka ei noudattanut automatiikan ohjausta, vaan oli suunnitellusta poiketen jatkuvasti täysetholla päällä. Myös esimerkiksi laiteviat, kuten jumiutuneet palopellit voivat vaikuttaa painesuhteisiin tai käyttäjät, jotka peittävät ilmanvaihdon pääte-elimiiä (Björkroth ja Eskola 2019).

Painesuhteiden hallintaan liittyviä haasteita käytännön tutkimuskohteista Alangon 2018 tutkimuksessa esitellään taulukossa 2. Osatehokäytöllä käytön ulkopuolisen ilmanvaihdon ilmavirrat ovat pienemmät ja jaksottaiskäytöllä koneet ovat osan ajasta seis ja osan ajasta koneita käytetään mitoitusteholla. Björkroth ja Eskola (2019) listaavat syitä, jotka ovat johtaneet rakennuksissa liian suureen alipaineeseen:

- Poisto on mitoitettu tuloa isommaksi varmuuden vuoksi mittausepävarmuuden kompensoimiseksi
- Suunnittelussa ei huomioida erillispoistojen korvausilman saantia
- Ilmavirtojen mitoitus on puutteellinen
- Ilmavirtojen säätö on puutteellinen
- Ohjausautomaatio on puutteellinen

Taulukko 2. Alangon (2018) tutkimuksessa esiintyneitä haasteita painesuhteiden hallintaan liittyen osatehokäytöllä sekä jaksottaisella käytöllä, jossa käytön ulkopuolisena aikana koneet ovat osittain seis ja käytetään tuuletusjaksoja mitoitusteholla.

Osatehokäyttö	Jaksottainen käyttö
Rakenteiden heikko tiiveys vaikeuttaa painesuhteiden arviointia	Rakenteiden heikko tiiveys vaikeuttaa painesuhteiden arviointia
Ilmanvaihtokoneiden tehotasot eivät olleet portaattomasti säädettävissä	Kahdessa rakennusosassa erilaiset ilmanvaihdon käyttöajat
Hygieniatilojen huippuimuri ei seurannut automatiikan ohjausta, minkä vuoksi se oli jatkuvasti mitoitusteholla käynnissä	Hygieniatilojen huippuimuri ei seurannut automatiikan ohjausta, minkä vuoksi se oli jatkuvasti mitoitusteholla käynnissä

Ilmanvuotoreitit rakennusvaipan sekä rakennusosien välillä vaikuttavat paine-erojen muodostumiseen rakennuksen eri osissa. Eri tilojen mitoitusilmavirrat vaikuttavat painesuhteisiin ulkoilmaan nähden ja rakennuksen sisällä ja myös ilmavirtojen säätö on tehtävä tilakohtaisesti huolella. (Björkroth ja Eskola 2019.) Myös paine-ero alapohjan ja tilojen välillä on

tärkeä huomioida esimerkiksi radonin takia. Radonin kulkeutumisen kannalta tiivis alapohjan rakenne ja alipaineen välttäminen alapohjaan nähden estävät radonin kulkeutumista sisäilmaan. Tehokas ilmanvaihto on tärkeää, mutta liian suuri alipaine esimerkiksi erillispoistoista voi lisätä radonin pitoisuutta sisäilmassa. Tässäkin tulo- ja poistoilmavirtojen tasapainoisuus on hyvä asia. Myös erillinen alapohjan tuuletus on hyvä tapa. (Säteri ja Koskela 2014, 65.)

3.5 Kosteus ja epäpuhtaudet

Kiinteistön ulkorakenteen on tärkeä olla kunnossa kiinteistön kosteusteknisen turvallisuuden takaamiseksi. Pitkäranta (2016) on todennut, että rakennusvirheet ovat yksi kosteusvaurioiden riskitekijä. Rakenteet myös ikääntyvät. Jonkin virheen seurauksena rakennukseen tullut kosteusvaurio on mahdollinen kemiallisten tai biologisten epäpuhtauksien lähde (Säteri ja Koskela 2014, 69). Paine-ero aiheuttaa ilman liikettä, ja se kuljettaa samalla mukanaan kosteutta, lämpöä ja mahdollisia epäpuhtauksia (Pitkäranta 2016). Jos alipaine rakennuksessa kasvaa suureksi, voi rakenteista siirtyä epäpuhtauksia tai maasta mikrobeja epäjatkuvuuskohtien kautta (Björkroth ja Eskola 2019). Seinärakenteen kosteusriski määritetään mittaamalla paine-eroa rakennusvaipan yli (Pitkäranta 2016).

Kosteus ja lämpötila vaikuttavat voimakkaasti erilaisten mikrobien ja homeiden kasvuun, ja alle 75 %:n suhteellisella kosteudella kasvua ei juurikaan esiinny. Parhaat kasvuolosuhteet ovat 20–30 °C lämpötila ja 95–99 %:n suhteellinen kosteus. (Pitkäranta 2016.) Kun suhteellinen kosteus rakenteissa ylittää 80 %RH, voi mikrobikasvu alkaa. Mikäli kosteusvaurio pääsee syntymään, haitta käyttäjille muodostuu itiöistä ja kaasumuotoisista aineenvaihduntatuotteista tai niiden sisältämistä toksineista. (Säteri ja Koskela 2014, 67.). Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen (Kuntien sisäilmaverkosto 2019) mukaan opetusrakennuksissa ei yleensä kuitenkaan ole erityisen paljon kosteustuottoa. Mahdollisia muita sisätiloihin kantautuvia epäpuhtauksien lähteitä Pitkärannan (2016) mukaan ovat huoneilan pintamateriaalit, ilmanvaihtojärjestelmän materiaalit, rakenteiden materiaalit, maaperä, ulkoilma, viereisten tilojen epäpuhtaudet ja aikaisemmin rakenteisiin imeytyneet epäpuhtaudet myös korjatuissa tiloissa. Hyvin voimakkaan alipaineen vuoksi myös yläpohjasta on mahdollista kulkeutua epäpuhtauksia (Pitkäranta 2016).

Ulkoilman ollessa sisäilmaa kylmempää, ulkorakenteen lämpötila viilenee sisätiloista ulointa rakennetta kohden. Tällöin ylipaine aiheuttaa riskin rakenteille, kun konvektio pääsee siirtämään sisäilman kosteutta rakenteen sisään. Epätiivit kohdat, kuten höyrinsulkuun tulleet reiät tai halkeamat betonissa ovat riskitekijä. Kosteus voi siirtyä myös esimerkiksi läpivientien ja rakenteiden saumakohtien kautta. Jos kastepiste saavutetaan, sisäilman kosteus tiivistyy sisäilmaa viileämmässä rakenteessa. Kosteuskonvektion vaikutuksesta vauriot ovat yleensä paikallisia. Kosteutta kulkeutuu myös ehjien rakenteiden läpi, mutta merkittävästi pienemmässä määrin. Erityisesti yläpohjassa ehjä höyrinsulku on tärkeää, sillä hormi-vaikutuksen vuoksi rakennusten yläosissa on usein talvella ylipainetta ulkoilmaan nähden. (Pitkäranta 2016.) Mikäli talvella on alipainetta, on ilman liikkeen vaikutus toisaalta rakenteita kuivattava, kun ulkoilma on sisäilmaa yleensä kuivempaa (Pitkäranta 2016). Rakenteen tulee suojata rakennusta myös esimerkiksi viistosateelta (A 1009/2017), joiden määrä lisääntynee ilmastonmuutoksen myötä.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen mukaan tuuliolosuhteista johtuva hetkellinen ylipaineisuus ei vaadi toimenpiteitä (Valvira 2016). Ylipaineisuuden pitkittyessä riskit kuitenkin kasvavat. Kuuselan (2020) RTA-opinnäytetyössä tutkittiin ylipaineen seurauksia pitkäaikaisesti 10–25 Pa ylipaineistetulla Jäälän koululla. Rakennus oli tarkoituksella useita vuosia ylipaineisena ulkoilmaan nähden ja rakenteissa tiedettiin olevan riskejä ja vaurioita. Rakennuksen ilmantiiveys oli heikko ja siinä oli isoja lämpövuotoja. Pitkäaikainen ylipaine lisäsi mikrobivauriota höyrinsulun epäjatkuvuuskohdissa. On mahdollista, että ilmankosteutta on siirtynyt ilmapuotokohdissa ja yhdessä huonon lämmöneristyksen kanssa aiheuttanut mikrobikasvustolle hyvät olosuhteet. Ehjien höyrinsulkujen kohdissa mikrobikasvustoa ei ollut. Kohteella oli myös muuta rakenteellisen kosteuden lähdettä ja mikrobivaurion riskitekijöitä. Kuusela tulkitsee, että yhdistetyt riskit, eli höyrinsulun reiät ja lämmin vuotoilma sisältä ulos lisäsivät mikrobikasvua. Rakenteiden läpi vuotaneessa lämpimässä sisäilmassa ollut kosteus on päässyt tiivistymään rakenteeseen. Myös Pitkäranta (2016) mainitsee, että rakennuksen tai sen osien ylipaineistaminen on joissakin poikkeustilanteissa mahdollista, mutta arvioitava tapauskohtaisesti. Tutkimuskohteeksi valittiin tässä työssä nimenomaan rakennus, jossa ei ole havaittu tai epäilty sisäilmaongelmaa ja jossa ilmanvaihto on hyvin säädetty.

3.6 Paine-erojen tavoitetaso ja suunnittelu

Tätä tutkimusta varten on käyty läpi lainsäädäntöä rakennusvuodesta kirjoitushetkeen erityisesti paine-erojen hallinnan osalta keskittyen korkeakoulurakennuksiin. Paine-erojen tavoitetasoa on etsitty lisäksi muusta kirjallisuudesta, kuten ohjeistavista teksteistä ja kirjallisuuskatsauksessa on keskitytty erityisesti tulo-poistoilmanvaihdolla varustettuihin kohteisiin.

Björkroth et al. (2020) ovat todenneet, että ilmanvaihdon suunnittelun tavoitteena on pidetty pitkään pientä alipainetta rakennusvaihan yli, ja tämä on ilmanvaihtoa suunnitellessa tehty prosentuaalisella erolla tulo- ja poistupuolen kokonaisilmamääriin. Alangon (2021) mukaan laaja paine-eroväli on aiheuttanut ongelmia ilmavirtauksissa ja erityisesti nykyrakentamistavan mukaiset aikaisempaa tiiviimmät rakennukset vaativat pienempää alipainetta.

Rakentamismääräyskokoelman osa D2 käsitteli rakennusten sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa, ja on ollut case-tutkimuskohteen rakennushetkellä voimassa (Edilex 2022). Rakennusmääräyskokoelman D2 (RakMK, D2/1987; RakMK, D2/2003) määrittävät, että kosteat tai paljon epäpuhtauksia sisältävät tilat pidetään alipaineisina ulkoilmaan nähden. Ne myös määrittävät, että painesuhteet eivät saa aiheuttaa rakenteille pitkäaikaista kosteusrasitusta. Molemmat suosittivat rakennuksen suunnittelemista ilmanvaihdolla hieman alipaineiseksi. Alipaine ei kummassakaan saa ylittää 30 Pa. Erikoistiloja saa suunnitella ylipaineiseksi ulkoilmaan nähden. D2/2003 ei enää sisällä ohjeistavaa tekstiä, jonka mukaan erillispoistoa voidaan pitää erikseen päällä. D2/1987 kuitenkin ohjeistaa, että WC-tilojen erillispoistopuhaltimia käyttämällä voi estää pitkäaikaisten ylipainetilanteiden aiheuttamia kosteushaittoja.

Ympäristöministeriön asetus A 1009/2017 ei suoraan aseta paine-eroille tavoitetasoja, mutta se määrittelee riittävät ilmavirrat suunnittelun pohjaksi. Asetuksen perustelumuihosta kerrotaan, että koska uusien rakennusten ilmantiiveys on parantunut, tulee liiallisia alipaineita välttää. Suunnittelussa tulee huomioida hormivaikutuksen vaikutus paine-eroihin rakennuksessa. Ulkovaipan ja osastointien tulee olla tiiviitä. Myös erillispoistojen vaikutus paine-eroihin tulee ottaa huomioon. Lainsäädäntö painottaa suunnittelun asiantuntemusta. Nykyisessä asetuksessa ja sen perustelumuihosta otetaan suunnittelussa huomioon ylipaineen estäminen erityissuunnittelijan toimesta. Ilmanvaihdolle on määritelty minimi-ilmamäärät erikseen käyttöajalle ja sen ulkopuolelle. Nykyisessä lainsäädännössä erityissuunnittelijan

vastuulla on huolehtia, ettei ilmanvaihto aiheuta paine-eroihin liittyviä riskejä. Uuden rakennuksen käyttöönoton yhteydessä ilmavirrat tulee mitata ja säätää, ja poikkeamat suunnitelluista voivat olla huonekohtaisesti $\pm 20\%$ tai vähintään $1 \text{ dm}^3/\text{s}$ sekä ilmanvaihtojärjestelmäkohtaisesti $\pm 10\%$. (A 1009/2017.)

Myös Asumisterveysasetusta on tarkoitettu sovellettavaksi asuinrakennusten lisäksi koulutuskäyttöön tarkoitettuihin rakennuksiin, sillä ne on tarkoitettu myös muiden kuin työntekijöiden pitkäaikaiseen oleskeluun. Terveysturvallisuuslaki (L 19.8.1994/763) määrittää tilat, mukaan lukien korkeakoulut, joihin asumisterveysasetusta sovelletaan. (Valvira 2016.) Asumisterveysasetus (A 545/2015) ottaa painesuhteiden hallinnan osalta kantaa tarkasti vain asiantuntijoiden osaamistasoon. Asetuksen ohjeistus määrittää tarkemmin toimenpiderajat paine-erolle rakennusvaipan yli. Mikäli alipaine rakennuksessa ylittää 15 Pa , tulee ohjeen mukaan syy selvittää ja yrittää pienentää alipainetta, mikäli se on mahdollista. (Valvira 2016.)

Nykyään rakennukset suunnitellaan lähelle tasapainoa. Björkrothin et al. (2020) mukaan ylipaineen välttely voi johtaa siihen, että ilmavirtoja saatetaan säätää varmuuden vuoksi siten, että alipaine suurenee edelleen. Rakennusten tiiviiden kasvamisen vuoksi kirjoittajat päättelivät myös rakennusten alipaineisuuden kasvaneen 2000-luvun aikana. Jos ilmamäärät suunnitellaan perinteisin metodein, paine-erot kasvavat. Säteri ja Koskela (2014, 67) kehoittavat välttämään suurta alipainetta myös vanhemmissa rakennuksissa, sillä riskinä on mahdollisen vauriorakenteen läpi tuleva korvausilma.

Sekä ylipainetta että liiallista alipainetta rakennusvaipan yli tulee välttää. Paine-eron tavoitetasoon vaikuttaa Björkrothin et al. (2020) rakennuksen käyttö, rakenteet ja ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi. Erilaisissa tiloissa käytöstä aiheutuva sisäilman kosteuslisä on erilainen, eli tavoitearvokin tulee olla erilainen. Tarkan tavoitetason määrittämiseksi tulee siis tuntea rakennuksen erityispiirteet. Alanko (2021) muistuttaa, että vaikka ilmanvaihtoa ohjataan eri tavoin käyttöaikana ja sen ulkopuolella, ei paine-eron tavoitetaso muutu käytön mukaan.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, joka koskee asuinrakennuksia sekä kouluja, ohjeistaa alipaineisuudesta seuraavaa: ”Hetkellinen ylipaineisuus on mahdollista tuuliolosuhteista tai rakennuksen geometriasta johtuen, eikä vaadi korjaustoimenpiteitä. Jos alipaineisuus on

yli 15 Pa, niin alipaineisuuden syy tulee selvittää ja ilmanvaihtoa mahdollisuuksien mukaan tasapainottaa. Tällä vähennetään vuotoilmavirtauksia ja niiden mukana kulkeutuvia epäpuhtauksia” sekä ”— käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihto ei saa aiheuttaa epäpuhtauksien kulkeutumista sisätiloihin esimerkiksi korvausilman puutteesta syntyneen liiallisen alipaineisuuden vuoksi”. (Valvira 2016.)

Björkroth ja Eskola (2019) ehdottavat paine-erojen tavoitetasoksi nykyaikaisille tiiviille opetusrakennuksille, joilla ei ole erityistä kosteuskuormaa, seuraavaa: Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero rakennusvaipan yli ilman tuulen ja lämpötilan vaikutuksia +5...-5 Pa tavallisessa käyttötilanteessa. Yläraja on tiukempi, sillä kirjoittajien mukaan +5 Pa ei saisi ylittyä, mutta myöskään -10 Pa ei saisi alittua. Kirjoittajat suosittelevat edelleen likaisten tilojen alipaineisuutta muihin tiloihin nähden, mutta näissäkin tiloissa ulkoilmaan nähden -30 Pa ylittävää alipainetta ei saisi tulla. Toleranssialueeksi on määritetty $\pm 2 \dots \pm 5$ Pa. Esimerkiksi Senaatti-kiinteistöt määrittelee yleisenä ohjeistuksena rakennusvaipan yli mitattavan paine-eron tavoitearvon alle 5 m/s tuulella ja ulkolämpötilan ollessa yli -10 astetta rakennuksilleen korkeuden mukaan: 1–2-kerroksiselle rakennukselle tavoite on kiinteä -5..0 Pa ja 3–5-kerroksiselle on alimmassa kerroksessa -10...0 Pa, kun taas ylimmässä kerroksessa se on -5...+5 Pa. Tavoitteena on pysyä rajojen sisällä 90 % ajasta. (Alanko 2021.). Björkroth ja Eskola (2019) muistuttavat, että eri tiloihin, joilla on eri käyttötapa, tulisi määritellä omat tavoitetasonsa erikseen.

3.7 Paine-eron mittaaminen

Tässä luvussa esitellään paine-eron mittaamiseen liittyviä ohjeistuksia, laitevaatimuksia ja mahdollisia virhelähteitä. Painetta voidaan mitata suhteellisena paineena, absoluuttisena paineena tai paine-erona. Tässä luvussa keskitytään ainoastaan paine-eron mittaamiseen. Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan paine-eroa voidaan mitata hetkellisenä, seuranta- tai jatkuvatoimisena mittauksena. Sisäilmayhdistys (2008) suosittelee sisällyttämään mittauksiin kaikki erilaiset ilmanvaihdon tilanteet. Pitkäranta (2016) suosittelee mittaamaan rakennuksen paine-eroja normaalikäytöllä ovet ja ikkunat suljettuina, ja välttämään ääriolosuhteita ulkolämpötilassa ja kovaa tuulta. Björkrothin ja Eskolan (2019) mukaan sopiva pituus seurantamittaukselle on 1–2 viikkoa ja mittausjaksoon tulisi sisällyttää viikonloppu.

Kuten on jo mainittu, tuuli vaikuttaa paine-eroihin. Björkroth ja Eskola (2019) opastavat suodattamaan sääolojen vaikutuksen pois. Hetkellisiä mittauksia ei suositellakaan suoritettavan sään ääriolosuhteissa, kuten tuulisella tai erityisen kylmällä säällä. Jatkuvatoimisissa mittauksissa voidaan tuulen vaikutukseen varautua mittausten sijoittelulla tai suodattamalla pois mittaukset, joissa tuulennopeus ylittää halutun rajan. Alangon (2021) mukaan Senaatti-kiinteistöille määritetyt paine-eron tavoitteet ovat käytössä alle 5 m/s tuulennopeuksilla ja tuulennopeuden seuranta tehdään 10 minuutin keskiarvoseurantana. Paine-erohälytyksiin suositellaan puolestaan käytettävän tunnin liukuvaa keskiarvoa.

Koko rakennuksen paine-erojen määrittämiseksi tarvitaan useampia mittauspisteitä. Björkroth ja Eskola (2019) suosittelevat vähintään kahdelta julkisivulta mittaamista ilmanvaihtokoneen palvelualueella tai palo-osastoa kohden. Termisen paine-eron vuoksi useampikerroksisessa rakennuksessa erityisesti kylmällä säällä on mittaukset toteutettava sekä alimmassa että ylimmässä kerroksessa kahteen ilmansuuntaan. Lisäksi yli 5-kerroksisissa rakennuksissa tulisi mitata porraskäytävän paine-eroa ulkoilmaan ja sisätiloihin. (Björkroth ja Eskola 2019.) Senaatti-kiinteistöillä jatkuvaan seurantaan tarkoitettut kiinteät paine-eromittaukset sijoitetaan alle 5-kerroksisessa rakennuksessa joka kerrokseen kahteen ilmansuuntaan ja siten, että mittauksia on eri ilmanvaihtokoneiden palvelualueilla, eri ilmansuunnissa kaikilla julkisivuilla (Alanko 2021).

Björkroth ja Eskola (2019) suosittavat jatkuvatoimisten paine-eromittausten asentamista uudisrakennuksiin, sekä vanhoihin rakennuksiin tiivistyskorjausten yhteydessä. Paine-eroa on perinteisesti mitattu vain ongelmakohteissa, mutta myös terveet rakennukset hyötyvät paine-eroseurannasta. Jatkuvatoimisella paine-eroseurannalla voidaan valvoa, ettei ongelmia synny liian suurten ali- tai ylipaineiden kanssa huonon säädön tai vikojen vuoksi. Jatkuvatoimisia mittauksia voi hyödyntää ilmanvaihdon tasapainotuksen yhteydessä. Ilmanvaihtokoneissa olevat mittaukset eivät kirjoittajien mukaan reagoi herkästi pieniin muutoksiin ilmavirroissa, jolloin osa vioista jää piiloon. Suodattimien likaantuminen, palopeltien laukeaminen, säätöpeltien vikaantuminen tai jumittuminen ja puhaltimen hihnan luistaminen ovat vikoja, joissa paine-eromittaukset voivat auttaa vian paikallistamisessa. (Björkroth ja Eskola 2019.) Kiinteää paine-eromittausjärjestelmää suunnitellessa Senaatti-kiinteistöillä varaudutaan mitoittamaan ilmavirtoja jopa uudestaan (Alanko 2021).

3.7.1 Laitteiden vaatimukset

Paine-eron mittaamiseen rakennuksen ulkovaipan yli tulee antureiden olla riittävän tarkkoja käyttötarkoitukseen. Björkroth ja Eskola (2019) määrittävät paine-eromittarin tarkkuuden vaatimukseksi seuraavaa: mittausalue vähintään $-50...+50$ Pa ja maksimimittausvirhe alle ± 1 Pa mittausvälillä $-10...+10$ Pa. Lukematarkkuuden tulee olla minimissään 1 Pa, mielellään 0,1 Pa. Seurantamittausta varten kirjoittajat suosittelevat laitetta, jolle voi tallentaa vähintään 10 000 näytettä vähintään 1 minuutin välein.

Paine-eromittauksiin voidaan käyttää läpivirtaukseen perustuvaa anturia, tai kalvopaineanturia. Esimerkiksi Senaatti-kiinteistöt suosittelee käyttämään kalvopaineanturia läpivirtausanturin sijaan. Läpivirtausantureissa on huomioitava, että mittausletkun minimihalkaisijaa ei aliteta. (Alanko 2021.) Paine-eroa mitattaessa on mittausletku saatava ulos esimerkiksi ikkunanpielestä. Björkroth ja Eskola (2019) suosittelevat läpivientiin kuparikapillaariputkea tai ohutta pneumatiikkaputkea. Läpivirtausanturia käytettäessä mittaustulos voi vääristyä, jos käytetään halkaisijaltaan liian pientä läpivientä, joten kapillaariputken käyttöä ei suositella lainkaan (Alanko 2021). Laitetoimittajista ainakin Pietiko (N.d.) ohjeistaa anturikohtaisesti sopivien mittausletkujen ja läpivientiin sopivien pneumatiikkaputkien käytöstä.

3.7.2 Asennus

Pietikon MIRAN DLS-läpivirtausantureiden kanssa läpivientiin voi käyttää minimissään 2,5 mm sisähalkaisijan putkea ja tällöin läpiviennin pituus tulee pitää mielellään alle 30 cm pituisena ja paineletkun maksimipituus on 2 metriä (Pietiko N.d.). Senaatti-kiinteistöt puolestaan ohjeistaa, että letkun ei tulisi olla yli 1 metriä pitkä (Alanko 2021). Jos läpivienti seinän tai ikkunan läpi ei ole mahdollista, myös epäsuoran mittauksen tai referenssilinjan käyttäminen paine-eromittauksissa on mahdollista (Björkroth ja Eskola 2019). Esimerkiksi Senaatti-kiinteistöjen nykyohjeistus ei kuitenkaan suosittele referenssilinjan käyttöä, mikäli sitä voidaan välttää (Alanko 2021).

Myös mittauspisteen korkeus tulee ottaa mittauksissa huomioon. Björkroth ja Eskola (2019) ohjeistavat, että mittauskorkeus on 1,0 metriä lattiapinnasta. Mikäli tavoitekorkeudesta poiketaan yli 0,3 m, on tehtävä termisen paine-eron korjauslaskenta. Alanko (2021) suosittelee

pitämään letkun korkeudeltaan 30 cm sisällä painelähettimen kanssa. Laitevalmistaja Pietiko (N.d.) suosittelee sadesuojausta pienellä määrällä silikoniletkaa ikkunan ulkopuolelle jäävään päähän.

4 Yliopistorakennuksen paine-erojen mittaaminen

Mittaukset päätettiin suorittaa mahdollisimman tavanomaisen käytön aikana, mikä rajasi opetuskäytössä olevan kohteen osalta kesäkuukaudet pois. Hormivaikutuksen suuruus paine-eroihin on pienempi pienemmällä lämpötilaerolla sisä- ja ulkotilojen välillä, eli opetusrakennuksen tapauksessa parhaita mittausaikoja ovat syyslukukauden alussa tai kevätlukukauden lopussa. Tutkimusajanjaksoksi valikoitui näistä syyslukukauden alku. Mittauslaitteiden valinnassa noudatettiin erityisesti Ympäristöministeriön julkaisemaa Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraporttia (Björkroth ja Eskola 2019) ja laitevalmistajan ohjeistuksia.

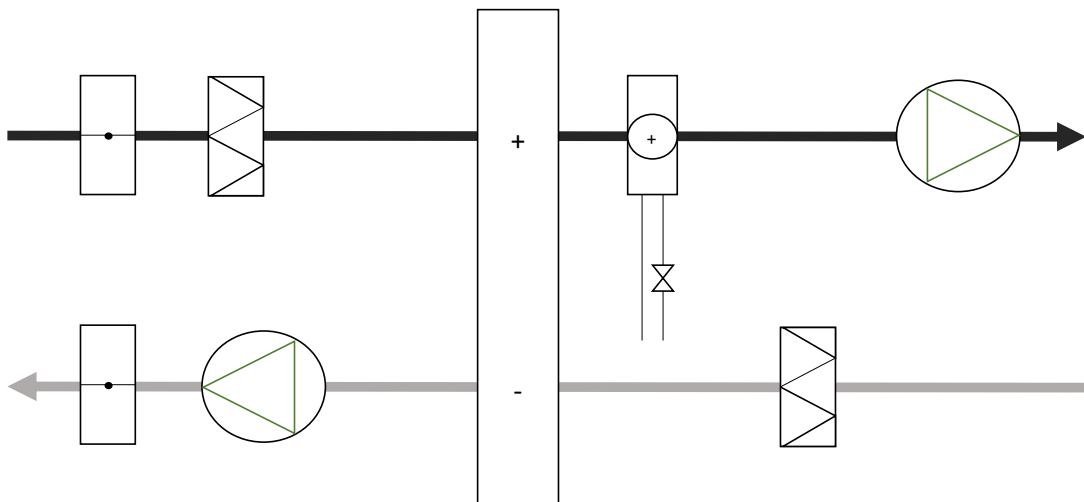
4.1 Tutkittavan kohteen nykytila

Tutkimuksen kohteena on vuonna 2004 käyttöön otettu kolmikerroksinen rakennus, joka on yhteydessä kahteen kampuksen muuhun rakennukseen porraskäytävän tai kulkusillan kautta, ja se on kytketty kaukolämpöverkkoon. Rakennuksessa ei ole säännöllistä iltakäyttöä päätoiminnan lisäksi, eikä siinä ole myöskään ravintolatoimintaa. Kohde on opetus- ja tutkimuskäytössä, joten tavanomaisin käyttö rakennuksella on syys- ja toukokuun välisenä aikana, ja kesällä käyttöaste on pienempi. Rakennuksen tiiveyttä ei ole mitattu, eikä kiinteitä paine-eromittauksia ole.

Tutkittavassa rakennuksessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka koostuu kolmesta ilmanvaihtojärjestelmästä. Tulo-poistoilmanvaihtokoneilla on taajuusmuuttajaohjatut puhaltimet, pyörivä lämmöntalteenottokiekko ja lämmityspatteri, ja osassa koneita tuloilman jäähdytys. Ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus ja säätö oli tehty ennen diplomityötutkimusta kesän 2022 aikana. Kohteen säännölliset käyttöajat ajoittuvat arkisin klo 6–18 välille. Erillispohjoistopuhaltimet ovat joko taajuusmuuttajasäätöisiä, yksi- tai kaksitehopuhaltimia, ja niitä on käynnissä myös tulo-poistoilmanvaihdon sammuttua. Ilmanvaihtokoneilla ei ole jatkuva-toimisia ilmamäärämittauksia lukuun ottamatta muutamaa ilmamääräsäädettyä tilaa.

Yksinkertaistettu prosessikuva kohteen ilmanvaihtojärjestelmistä on kuvassa 4. Ilmanvaihtojärjestelmillä on tulo- ja poistokanavissa puhaltimet ja suodattimet sekä raitis- että

jäteilmapellit. Lisäksi koneilla on pyörivä lämmöntalteenotto laite sekä lämmityspatteri. Ilmanvaihtokoneella TK351 on aikaohjelma arkisin 7–16 arkisin, ja lupa käynnistyä uudelleen läsnäoloanturin aktivoitumisesta. TK352 ilmanvaihtojärjestelmällä on säännöllinen aikaohjelma arkisin klo 7–16:30, mutta sen ulkopuolella ilmanvaihtokoneella on lupa käynnistyä hiilidioksidipitoisuuden perusteella. WC:n erillispoistopuhallin on puoliteholla pääilmanvaihdon ollessa seis. Ilmanvaihtojärjestelmällä TK353 aikaohjelma on arkisin 6–18. Kerroksittain koneelle on lisäaikakytkimet. Alimman kerroksen kolmessa huoneessa on tilakohtainen ilmamäärien tehostus läsnäolon ja lämpötilan tai ilmanlaadun mukaan, taajuusmuuttajaohjattu erillispoisto kiinteällä kanavapaineasetuksella sekä läsnäolotunnistimet. Ilmamäärää tehostetaan prosentuaalisella säädöllä läsnäolon ollessa aktiivisena ja jonkin ilmanlaatumittauksen ylittäessä raja-arvon. Muulloin ilmamäärä on minimiasetuksella. Ilmamäärämittaukset ovat tiedoksi, mutta eivät säätäviä. WC:n poistopuhallin on puoliteholla pääilmanvaihdon ollessa seis.



Kuva 4. Yksinkertaistettu ilmanvaihtokoneiden prosessikaavio.

Tutkittava kohde osallistuu tutkimushetkellä Fingridin taajuudenkorjausmarkkinalle. Aggregaattori toimittaa kulutusjoustopyyntisignaalin (-100 - +100 %) kohteen rakennusautomaatiojärjestelmään. Taakanjaon eri laitteiden kesken kampuksella on toteuttanut rakennusautomaatiourakoitsija aggregaattorin toimittamien ohjeiden mukaisesti. Kohteen kulutusjoustopille osallistuvat koneet ovat pääasiassa ilmanvaihtokoneita, joiden tehoa voidaan säätää rakennusautomaatioon määritettyjen minimi- ja maksimirajojen välillä.

Jokaiselle laitteelle määritetään oma minimi- ja maksimiteho. Neutraalilla pyyntisignaalilla, 0 %, on laitteella normaaliteho. Kysyntäjoustosignaalin mukaan normaalista tehoasosta poiketaan ylös- tai alaspäin siten, että painesuhteet pysyvät normaaleina joustojen aikana. (Holm 2022.) Tutkimuksen kohteena olevassa rakennuksessa kulutusjousto on määritelty siten, että kulutusjousto tapahtuu käytännössä maksimista alaspäin pyynnillä -100 %...0 %. Kun kampuksen kulutusjousto-signaali on 0 %... +100 %, Medistudia-rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmät eivät osallistu joustoon. Kulutusjoustopyynti muuttaa rakennusautomaatioissa suoraan ilmanvaihtokoneiden kanavapaineasetusta kullekin koneelle tulo- ja poistokanavaan erikseen suoraan kanavapaineasetukseen. Kulutusjousto on käytössä koneiden aikaohjelmien ollessa käynnissä, eikä kulutusjoustopyynti voi käynnistää tai sammuttaa ilmanvaihtokoneita. Kulutusjousto ei ole kytketty erillispoistopuhaltimiin.

4.2 Mittausjärjestelyt Medistudialla

Mittaukset päätettiin suorittaa seurantamittauksena, ja mittausjakson kestoksi valittiin Björkrothin ja Eskolan (2019) suosittelema pituus kaksi viikkoa. Kahden viikon mittausjaksoja oli kaksi, normaalijakso, jolloin ilmanvaihto ei ollut kulutusjoustokäytössä, sekä kulutusjoustojakso.

Kohteella ei ollut kiinteitä paine-eromittauksia. Mittaukset suoritettiin siirrettävällä seurantajärjestelmällä. Tutkimuslaitteisto koostui tukiasemasta ja yhdeksästä langattomasta painelähtimestä sekä kahdesta signaalinvahvistimesta. Paine-lähtimet olivat Miranin DLS IAQ.THB+CO2+DP -tyyppisiä antureita, jotka mittaavat lämpötilaa, suhteellista kosteutta, barometristä painetta, paine-eroa sekä hiilidioksidipitoisuutta. Antureiden tarkkuudet on esitetty liitteessä 1. Keskusyksikkö lähetti datan GSM-verkon kautta Miranlink-palveluun, jossa data on tarkasteltavissa graafisessa näkymässä tai ladattavissa csv-muodossa jatkokesittelyä varten (Pietiko N.d.) Anturit kalibroitiin ennen mittausten suorittamista.

Antureiden tarkkuuden vaikutusta mittaustuloksiin olisi voitu arvioida suorittamalla rinnakkaismittauksia. Asennustapojen aiheuttamaa virhettä pyrittiin minimoimaan noudattamalla Rakennusten paine-erojen mittausohjetta ja laitevalmistajan ohjeistuksia sekä käyttämällä laitevalmistajan omia letkuja. Mittausten edustavuus kohteella oli hyvä, sillä mittauksia oli jokaisessa kerroksessa ja eri ilmansuuntiin. Edustavuutta olisi parantanut vielä jonkin

auditorion paine-erojen mittaaminen ilmanvaihtokoneen TK351 vaikutusalueella. Tutkimuksen aikana yhdeltä lähettimeltä datan tulo katkesi hetkellisesti. Katkon ajalta tietoa kyseisen tilan paine-eroista ei ole, joten ne eivät ole mukana tunnuslukujen laskennassa. Mittausjakson lyheneminen yhteysvirheen takia voi vaikuttaa kyseisen mittauspisteen tulosten luotettavuuteen.

4.2.1 Paine-eron tarkkuustarkastelu

Käytettävien antureiden paine-eron mittausalue on ± 500 Pa ja tarkkuus ± 3 % mitattavasta arvosta. 0-pistetarkkuus on $+0,1$ Pa. Antureiden kalibrointiväli on yksi vuosi. (Pietiko N.d.) Laitteen tarkkuus 10 Pa:n paine-erolla on siis $\pm(0,003 \cdot 10 \text{ Pa} + 0,01 \text{ Pa}) = \pm 0,31$ Pa, eli alle ± 1 Pa ja täyttää tarkkuusvaatimuksen. Kalibrointi oli mittaushetkellä voimassa, sillä anturit kalibroitiin laitevalmistajan toimesta ennen mittauksia. Myös keskusyksikön päivitykset tehtiin samalla.

4.2.2 Asennus

Mittaukset suoritettiin 8.9.–5.10.2022. Käyttäjille laadittiin tiedote, joka toimitettiin toimistohuoneiden käyttäjille tilapalveluiden toimesta ja lisäksi tiedote asetettiin näkyville jokaisen laitteen luokse. Tiedotteessa kerrottiin tutkimuksen kestosta, tarkoituksesta ja lisäksi tiedotteessa oli kehoitus välttää ikkunoiden avaamista tutkimusjaksolla.

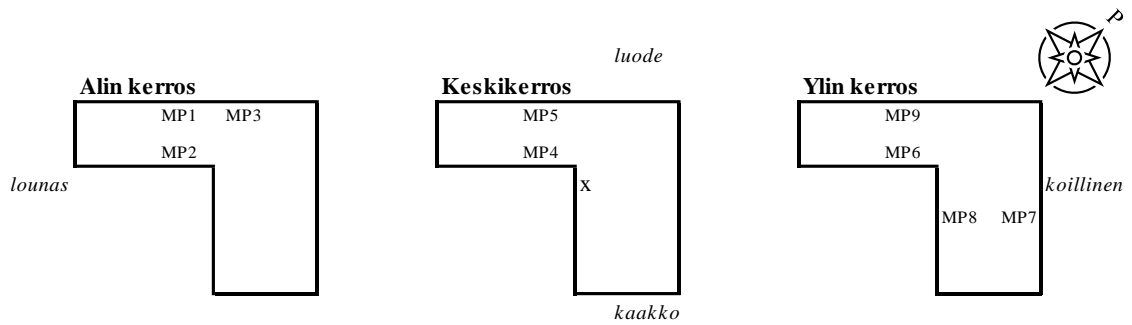
Asennuksissa otettiin huomioon luvussa 3.7 esitellyt paine-eromittausten luotettavuutta parantavat toimenpiteet, kuten sääsuojaus ja oikeanlaisten läpivientien valinta. Mittauksia asennettiin sekä opetus- että toimistotiloihin. Kukin paine-erolähetin asetettiin ikkunalaudalle. Paineletku asetettiin painelähtetimen miinusliittimeen. Mittalaitteet sijoitettiin ikkunalaudalle 0,9 metrin korkeuteen läpiviennissä käytettävän tuuletusikkunan lähelle. Paineeromittauksen läpivienti tehtiin ikkunan alakulmasta, kuten kuva 5 esittää. Paineen mittaukseen käytetty silikoniletku oli 50 cm pituinen, ja läpivientiin käytetty pneumatiikkaputki 30 cm pituinen. Ulkopuolelle jäävään päähän laitettiin lisäksi 10 cm pituinen silikoniputki sääsuojaksi valmistajan ohjeistuksen mukaisesti. Kun mittaustulos on alle nollan, on ilmoitettu tila alipaineinen ulkoilmaan nähden. Kun mittaustulos on positiivinen, on ilmoitettu tila ylipaineinen ulkoilmaan nähden.



Kuva 5. Painelähettimen asennus ikkunalaudalle ja läpivienti tuuletusikkunan kautta

Mittauspisteet toteutettiin kohteella pohjakuvaan tehdyn alustavan suunnitelman ja kohdekäynnin pohjalta. Mittauksien asentamisen ja paine-eron mittauksen johdonmukaisuuden tarkistamisen jälkeen keskusyksikölle etsittiin paras paikka keskimmäisestä kerroksesta. Signaali kaikille paine-erolähettimille ei ollut riittävällä tasolla pelkän keskusyksikön kanssa, joten vuokralle otettiin kaksi signaalinvahvistinta, jotka sijoitettiin kohteelle molemmat ylimpään kerrokseen. Yksi painelähetin oli varalaitteena.

Tutkimuksessa mitattiin paine-eroa rakennuksen ulkovaipan yli yhteensä yhdeksässä mittauspisteessä. Mittausten sijainnit ovat yksinkertaistetussa pohjakuvassa, kuvassa 6. Kuten luvussa 3 kerrotaan, on mittauksia hyvä suorittaa eri julkisivuilta ja ilmanvaihtokoneiden palvelualueilta. Tutkimuksessa sijoitettiin kuusi painelähetintä siten, että mittauspisteet tulivat kaikkiin kolmeen kerrokseen kahteen ilmansuuntaan samaan kohtaan ilmanvaihtokoneen TK353 vaikutusalueelle. Lisäksi yksi mittauspiste asennettiin alimpaan kerrokseen mittaamaan rakennusvaipan yli olevaa paine-eroa tilassa, jossa on ilmavirran säätö tarkoituksena seurata myös ilmavirtasäätöisen ilmanvaihdon toimintaa kulutusjouston aikana. Kaksi mittauspistettä tuli lisäksi rakennuksen toiseen siipeen ylimpään kerrokseen koilliseen ja lounaaseen päin oleville julkisivuille ilmanvaihtokoneen TK352 vaikutusalueelle. Ilmanvaihtokoneen TK351 vaikutusalueella ei ollut tutkimukseen sopivia tuuletusikkunoita läpivientiä varten.



Kuva 6. Mittausten sijainnit kohteessa

4.3 Kerättävä data

Analysoitava tutkimusaineisto kerättiin useasta lähteestä. Mittausväliksi valittiin yksi minuutti. Tällä tavoin ajateltiin saatavan analysoitua melko tarkasti esimerkiksi ylipainetilanteiden esiintyessä, millä osatekijöillä on tilanteeseen vaikutusta kasvattamatta kokonaistamäärää liian suureksi.

Säädettä saatiin Ilmatieteenlaitoksen avoimesta palvelusta. Kyselyllä tuotiin säähavainnot Kuopion Savilahden havaintoaseman numero 101586 (Ilmatieteenlaitos 2022a) havainnot tutkimusjaksolta yhden minuutin välein. Mittausasema on lahden toisella puolella tutkittavasta kohteesta, n. 600 m linnuntietä. Avoimesta palvelusta (Ilmatieteenlaitos N.d.a) haettiin ”fmi::observations::weather::simple”-kyselyllä seuraavat muuttujat:

- ws_10min, tuulennopeuden 10 minuutin liukuva keskiarvo (m/s)
- wd_10min, tuulen suunta (astetta)
- wg_10min, tuulen puuskanopeus (m/s)
- t2m, ilman lämpötila (°C).

Osa datasta pyydettiin rakennusautomaatiourakoitsijalta. Ilmanvaihtojärjestelmistä pyydettiin kanavapaineen normaaliasetus, kulutusjoustopyyntö ja mittaus sekä puhallinteho.

Ilmamääräsäätimiltä pyydettiin säätöarvo ja ilmamäärämittaus. Erillispoistojen ja vyöhykelpien tilatietoja ei ollut saatavilla. Dataa pyydettiin yhden minuutin välein.

Luvussa 4.1 esitelty laitteisto keräsi rakennuksen yhdeksällä mittauspaikalla sisälämpötilaa, suhteellista kosteutta, absoluuttista painetta, paine-eroa sekä hiilidioksidipitoisuutta. Keskusyksikkö lähetti tiedot Miranlink-palveluun, jota käytetään selaimella. Palvelussa voi tarkastella mittaustuloksia graafisesti tai ladata jatkokäsittelyä varten csv-muodossa.

Rakennusautomaation ja Miranin mittauslaitteiston kellonaika oli sama muutaman sekunnin tarkkuudella, joka on riittävä tarkastelussa minuutin tarkkuudella. Säädata on Ilmatieteenlaitoksella UTC-ajassa, eli kolmen tunnin aikaerolla Suomen kesäaikaan (Ilmatieteenlaitos N.d.b), joten Ilmatieteenlaitoksen data muutettiin samalle aikavyöhykkeelle.

5 Tulokset ja niiden arviointi

Tässä luvussa esitellään mittausten tulokset. Ensimmäisessä alaluvussa esitellään kulutusjouston pyynnit tutkimusjaksolla. Seuraavassa alaluvussa käsitellään säätilaa ajanjaksoilla. Alaluvuissa 5.3 ja 5.4 käsitellään paine-erojen käyttäytyminen tutkimusjaksoilla, ensin ilman kulutusjoustoja ja vastaavasti kulutusjoustoja.

Laskentaa ja analysointia varten mittaustuloksista suodatettiin pois tilanteet, joissa tuulen keskinopeus ylitti 5 m/s noudattaen mm. Senaatti-kiinteistöillä käytettävää ohjeistusta. Tarkempaa päiväkohtaista analysointia tehtiin kahtena torstaipäivänä, jolloin tuulen keskinopeus ei ylittänyt kertaakaan 5 m/s. Paine-eromittauksista laskettiin erikseen keskiarvo tilanteelle, kun kohde on normaalikäytöllä, klo 6–18. Tämän ulkopuolella ilmanvaihtokoneet ovat pääosin seis, mutta erillispoistoja on käynnissä. Tuloksista on analysoitu ylipainetilanteiden kesto, lukumäärä ja ylipaineen suuruus.

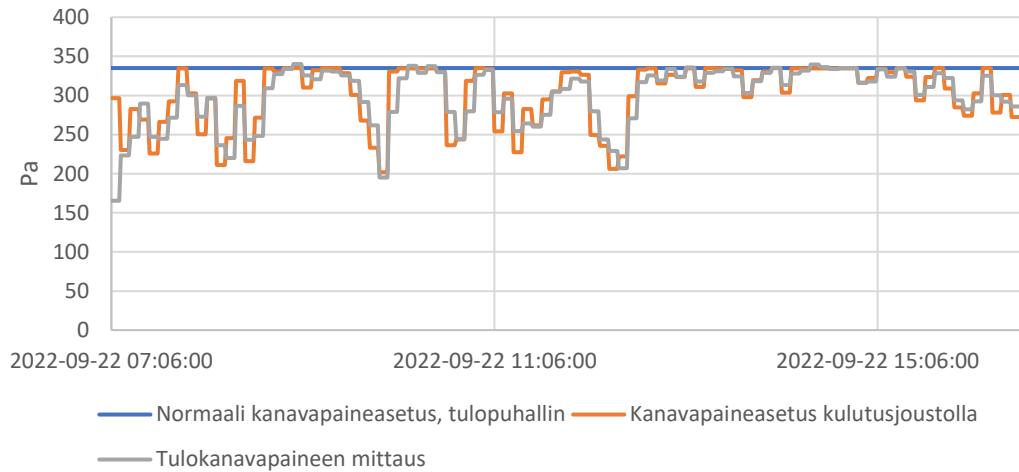
5.1 Kulutusjouston pyynnit testiajanjaksolla

Kulutusjoustopyynti muuttaa rakennusautomaatiassa suoraan tulo- ja poistokanavapaineasetusta kullekin koneelle. Taulukko 3 esittelee kaikkien ilmanvaihtokoneiden keskimääräiset kanavapaineiden pyynnit sekä normaali- että kulutusjoustoja. Kaikkien ilmanvaihtokoneiden kanavapainepyynnit olivat keskimäärin pienempiä kulutusjoustoja. TK351 koneella kulutusjoustolla on pyydetty keskimäärin 8 % pienempää kanavapainetta sekä tulo- että poistokanavassa, TK352:lla ja TK353:lla 10 % pienempää. Kulutusjoustopyynnillä aggregaattorilta voi olla jopa 6 eri arvoa minuutissa, eli arvo voi muuttua 10 sekunnin välein.

Taulukko 3. Ilmanvaihtokoneiden keskimääräiset kanavapaineasetukset normaali- ja kulutusjoustoja

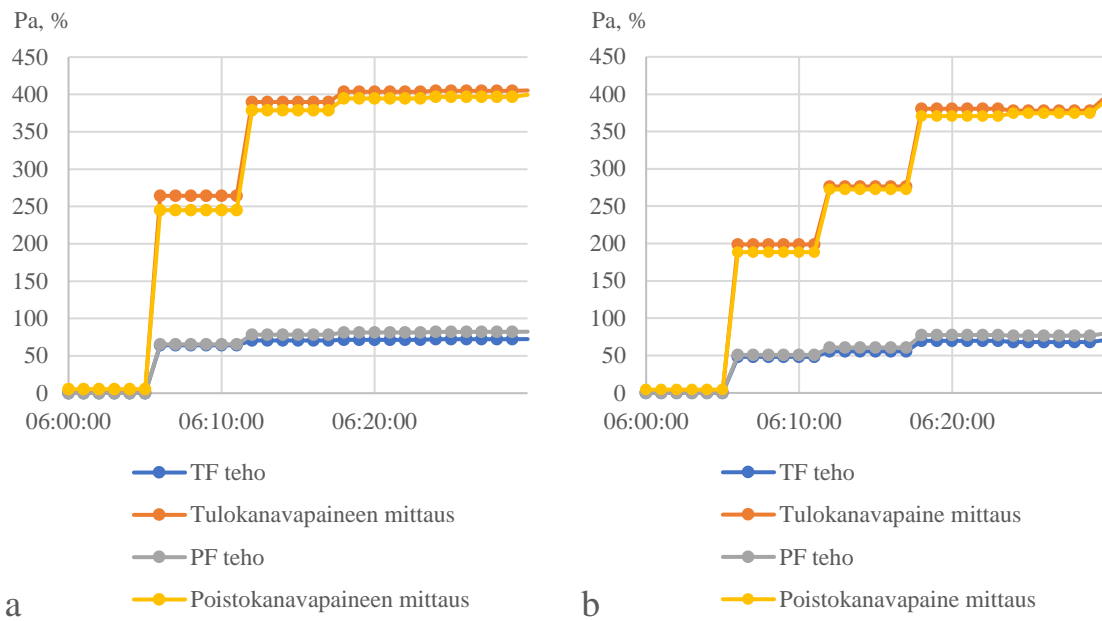
Kanavapaineet (Pa)	Tulo		Poisto	
	Normaalijakso	Kulutusjousto	Normaalijakso	Kulutusjousto
TK351	230	211	315	289
TK352	335	300	220	197
TK353	405	364	400	361

Yksittäinen kanavapaineen muutoksen suuruus kahden mittausajankohdan välillä oli maksimissaan 55–63 % normaalikanavapaineesta. Kuvassa 7 nähdään, miten TK352 koneen tulokanavapaine seuraa kulutusjoustoasetusta. Poistokanavapaine käyttäytyi hyvin samankaltaisesti. Normaalijaksolla kanavapaine noudatti normaalia kanavapaineasetusta. Oranssilla on kuvassa kulutusjoustolla pyydetty kanavapaine ja harmaalla toteutunut kanavapaine.



Kuva 7. Ilmanvaihtokoneen TK352 kanavapaineiden käyttäytyminen kulutusjoustolla

Ilmanvaihtojärjestelmistä verrattiin esimerkkipäivien osalta koneiden käynnistymishetkeltä puhaltimien säädön nopeutta eri mittausjaksoilla. Kuvasta 8 nähdään, kuinka kulutusjousto-
pyynti vaikuttaa ilmanvaihtokoneella TK353 kanavapaineisiin jo koneen käynnistyshetkellä. Mitoitettu kanavapaine (405 Pa/400Pa) saavutetaan normaalikäytöllä alle 20 minuutissa, mutta kulutusjoustolla mitoitustehoa ei saavuteta puolessa tunnissa käynnistymisestä. Ilmanvaihtokoneilta laskettiin myös kanavapaineen muutosnopeutta verrattuna edelliseen mittausarvoon, jotta tätä arvoa voidaan verrata muutoksiin paine-eroissa.



Kuva 8. Ilmanvaihtojärjestelmän TK353 käynnistys normaalitilanteessa (a) ja kulutusjoustolla (b).

5.2 Säädädata ajanjaksolla

Sääolosuhteiden vertailu tutkimusjaksoilla on esitetty taulukossa 4. Tuuliolosuhteet olivat keskimäärin tutkimusjaksoilla samankaltaiset. Ulkolämpötila oli normaalijaksolla keskimäärin kolme astetta lämpimämpää kuin kulutusjoustojaksolla. Alin mitattu lämpötila oli molemmilla mittausjaksoilla 2 astetta. Säätilassa tutkimusjaksolla ei ollut erityisiä äärisääti-
loja. Syyskuun 2022 keskilämpötila Kuopiossa oli 1,3 astetta vertailukauden 1991–2020 keskiarvoa alhaisempi. Lokakuun 2022 keskilämpötila Kuopiossa oli puolestaan 2 astetta keskimääräistä lämpimämpi. (Ilmatieteenlaitos 2022b.) Maksimi 10 minuutin keskituulen-
nopeus tutkimusjaksolla oli 6,7 m/s. Puuskatuulennopeus ylitti 10 m/s hetkellisesti 4 päi-
vänä. Näistä puuskista 80 % esiintyi yhtenä päivänä, 20.9., jolloin myös keskiarvoinen tuu-
lennopeus ylitti usein 5 m/s.

Taulukko 4. Sääolosuhteet tutkimusjaksolla

Sääolosuhteet	Normaalijakso	Kulutusjousto
Tuulen keskinopeus (m/s)	2	2
Ulkolämpötila, keskiarvo (°C)	10	7
Alin mitattu lämpötila (°C)	2	2
Ylin mitattu lämpötila (°C)	16	12

Normaalijaksolla puuttuu Ilmatieteenlaitoksen dataa aikaväliltä 16.9. klo 02:30–03:12. Kulutusjoustoajaksolla puuttuu Ilmatieteenlaitoksen dataa aikaväliltä 4.10. klo 04:03–04:14, ja myös kahdeksan yksittäistä minuutin jaksoa puuttuu. Puuttuvien arvojen määrä on pieni, eikä vaikuta olennaisesti tuloksiin.

5.3 Paine-erot normaalijaksolla

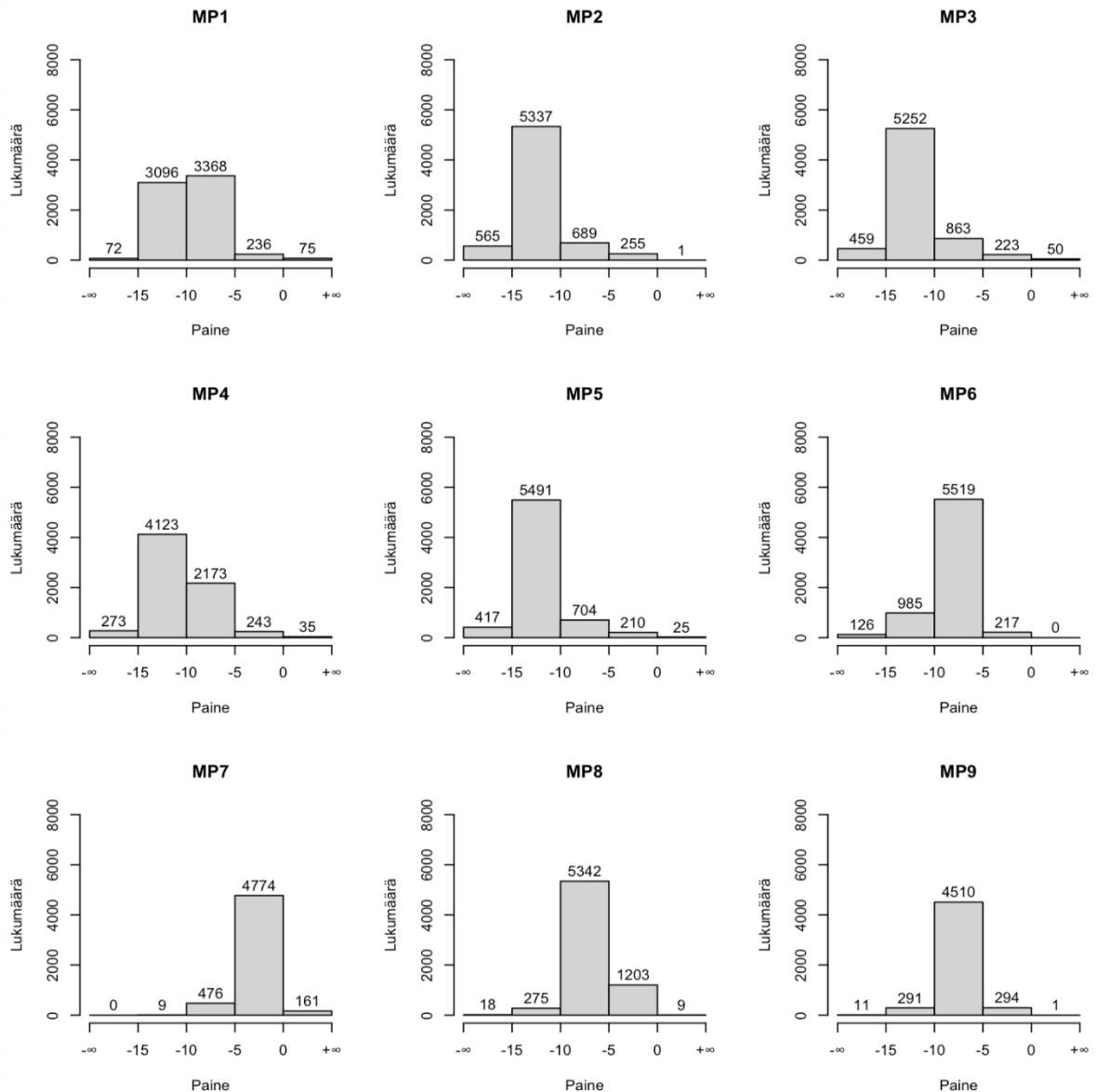
Normaalijakson mittaukset suoritettiin ajalla 8.–21.9.2022. Tämän jakson tuulisuodatettu arkiaikainen kaikkien mittauspisteiden paine-eromittausten keskiarvo oli -9,3 Pa. Kaikissa sijainneissa keskiarvoisesti tilat olivat alipaineisia ulkoilmaan nähden. Taulukossa 5 on keskiarvot kerroskohtaisesti ja mittauspistekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 2. Suurin keskimääräinen alipaine oli mittauspisteellä 3 alimmassa kerroksessa, -10,5 Pa. Pienin keskimääräinen alipaine oli mittauspisteessä 7 ylimmässä kerroksessa, -4,0 Pa.

Taulukko 5. Tulokset normaalijaksolla

		Kaikki	Alin kerros	Keski-kerros	Ylin kerros
Kaikki (Pa)	Keskiarvo	-7,8	-9,7	-8,8	-5,6
Viikonloppu, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-6,6	-8,2	-6,9	-5,0
Yöaika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-7,2	-9,3	-7,6	-5,0
Seis-aika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-6,9	-8,8	-7,3	-5,0
	Minimi	-54	-54	-25	-26
	Maksimi	4,7	-1,4	4,7	4,7
Arki-aika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-9,3	-11	-11	-6,6
	Mediaani	-9,6	-12	-12	-7,1
	Keskihajonta	3,8	3,4	2,9	2,9
	Minimi	-54	-54	-32	-33
	Maksimi	8,4	8,4	7,9	5,4
Ylipaineisten hetkien osuus (%)		0,6 %			
Yli -30 Pa alipaine, osuus (%)		0,7 %			
Yli -15 Pa alipaine, osuus (%)		9,2 %			

Kuvassa 9 on histogrammit kullekin mittauspisteelle normaalijaksolla ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä ja tuulen keskinopeuden ollessa maksimissaan 5 m/s. Alimman kerroksen mittauspisteissä MP1–3 esiintyy melko paljon yli 10 Pa:n alipainetta. Mittauspisteessä MP1 eniten mittauksia on välillä -10...-5 Pa välillä ja lähes yhtä paljon -15...-10 Pa välillä. Mittauspisteissä MP2 ja MP3 esiintyy eniten paine-eroja välillä -15...-10 Pa. Myös

keskimmäisessä kerroksessa eniten esiintyvä paine-eron suuruus on välillä -15...-10 Pa. Mittauspisteessä MP4 on eniten esiintymiä välillä -15...-10 Pa. Mittauspisteellä MP5 esiintyy selvästi eniten paine-eroa välillä -15...-10 Pa. Ylimmässä kerroksessa alipaineet jäävät alempia kerroksia keskimäärin pienemmiksi. Kolmella mittauspisteellä (MP6, MP8, MP9) esiintyy eniten paine-eroja välillä -10...-5 Pa. Mittauspisteellä MP7 esiintyy eniten paine-eroa -5...0 Pa välillä.

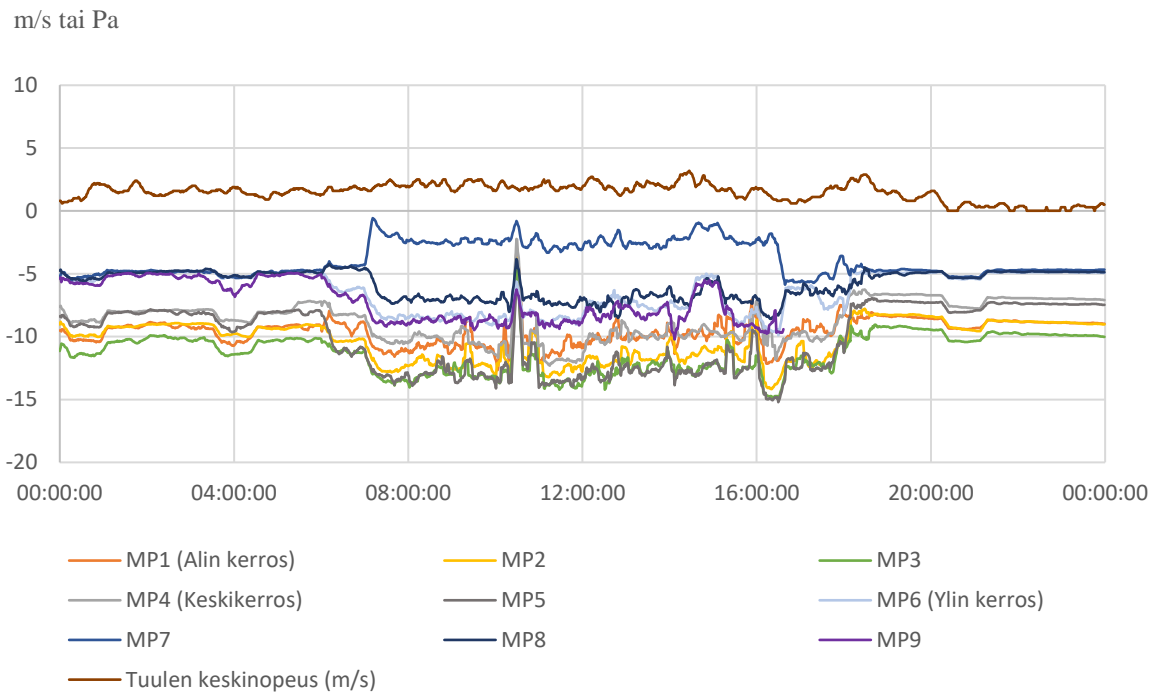


Kuva 9. Paine-erojen esiintyminen eri mittauspisteillä normaalijakson aikana ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä ja tuulenoisuuden ollessa maksimissaan 5 m/s

Kuvassa 10 on mahdollisimman vähätuulinen esimerkkiarkipäivä 8.9.2022, jolloin tuulen keskinopeus ei ylittänyt kertaakaan 5 m/s. Ulkolämpötilan vaihteluväli kyseisenä päivänä oli 4–11 °C. Rakennuksen käyttö näkyy muutoksina paine-eroissa vuorokauden aikana. Paineerot käyttäytyivät seuraavasti:

- Yöaikaan kohteen kaikissa mittauksissa on alipaine.
- TK353:n käynnistyessä alipaine ensin suurenee hyvin lyhyeksi aikaa, jonka jälkeen vielä pienenee hetkeksi kaikilla mittauksilla.
- Klo 7 TK351 ja 352 käynnistyvät sekä WC-erillispoiston teho muuttuu hitaalta nopealle. Tiloista yhdessä alipaine pienenee, kaikissa muissa alipaine suurenee.
- Päiväaikainen taso on kaikilla mittauksilla erilainen kuin käyttöajan ulkopuolinen taso. Osalla mittauksia päivällä käyttöaikana on suurempi alipaine, ja yhdellä mittauksella (MP7) on pienempi alipaine kuin käyttöajan ulkopuolella.
- Ilmanvaihtokoneiden sammuessa osassa mittauksia on havaittavissa hetkellinen voimakas alipaineen suureneminen.
- Mittauksista laskettu 10 minuutin liukuvan keskiarvo on kaikilla mittauspisteillä koko päivän alipaineinen.
- Ylipaineita on vain vähän ja suurin mitattu ylipaine oli 0,8 Pa.

Viikonloppupäivänä, jolloin päällä on vain erillispoistoja ja tuulen 10 minuutin keskinopeus ei ylitä kertaakaan 5 m/s, kaikki mittaukset pysyvät koko päivän alipaineisina. Alipaineen suuruus vaihtelee kuitenkin eri mittauspisteissä. Yhdellä mittauksella oli selvästi muita suurempi vaihteluväli.



Kuva 10. Paine-eromittaukset, liukuva keskiarvo torstaina 8.9.2022

Datasta analysoitiin myös ylipainetilanteet. Yhteensä uniikkeja alkaneita ylipainetilanteita oli kaikilla mittauksilla 348 kappaletta, ja niiden kesto oli yhteensä 386 minuuttia. Tilanteita, joissa jokin tila oli ylipaineinen, oli ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä 0,6 %. Suurin lukumäärä erillisiä ylipainetilanteita, 142 kappaletta, oli mittauspisteessä MP7. Samalla ylimmän kerroksen mittauspisteellä oli myös pisin ylipainetilanne, 7 minuuttia. Useimmiten ylipainetilanne kesti vain yhden mittauksen, eli noin minuutin. Vähiten ylipainetilanteita oli mittauspisteissä MP2, MP6 ja MP9. +5 Pa ylittäviä mittauksia oli mittausjaksolla 12 kpl, joten niiden osuus oli vain 0,1 %. Kun ylipaineita esiintyi, oli keskiarvoa kovempi tuulennopeus sekä puuskatuulennopeus. Suurin yksittäinen ylipaineen suuruus oli 8,4 Pa tutkimusjakson aikana. Paine-eron keskihajonta normaalijaksolla eri mittauspisteissä on esitetty taulukossa liitteessä 2. Yhdeksän mittauspisteen keskihajonta vaihteli välillä 1,7 Pa...3,8 Pa.

5.4 Paine-erot kulutusjoustojen aikana

Kulutusjoustojakson mittaukset suoritettiin ajalla 22.9. –5.10.2022. Tämän jakson kaikkien paine-eromittausten tuulisuodatettu arkiajan keskiarvo oli -9,0 Pa. Kaikissa sijainneissa

keskiarvoisesti paine-ero oli alipaineinen ulkoilmaan nähden. Taulukossa 6 on esitetty keskiarvot kerroskohtaisesti ja mittauspistekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 3. Suurin keskimääräinen alipaine oli alimman kerroksen mittauspisteellä MP3, -10,1 Pa. Pienin keskimääräinen alipaine oli ylimmän kerroksen mittauspisteellä MP7, -3,4 Pa.

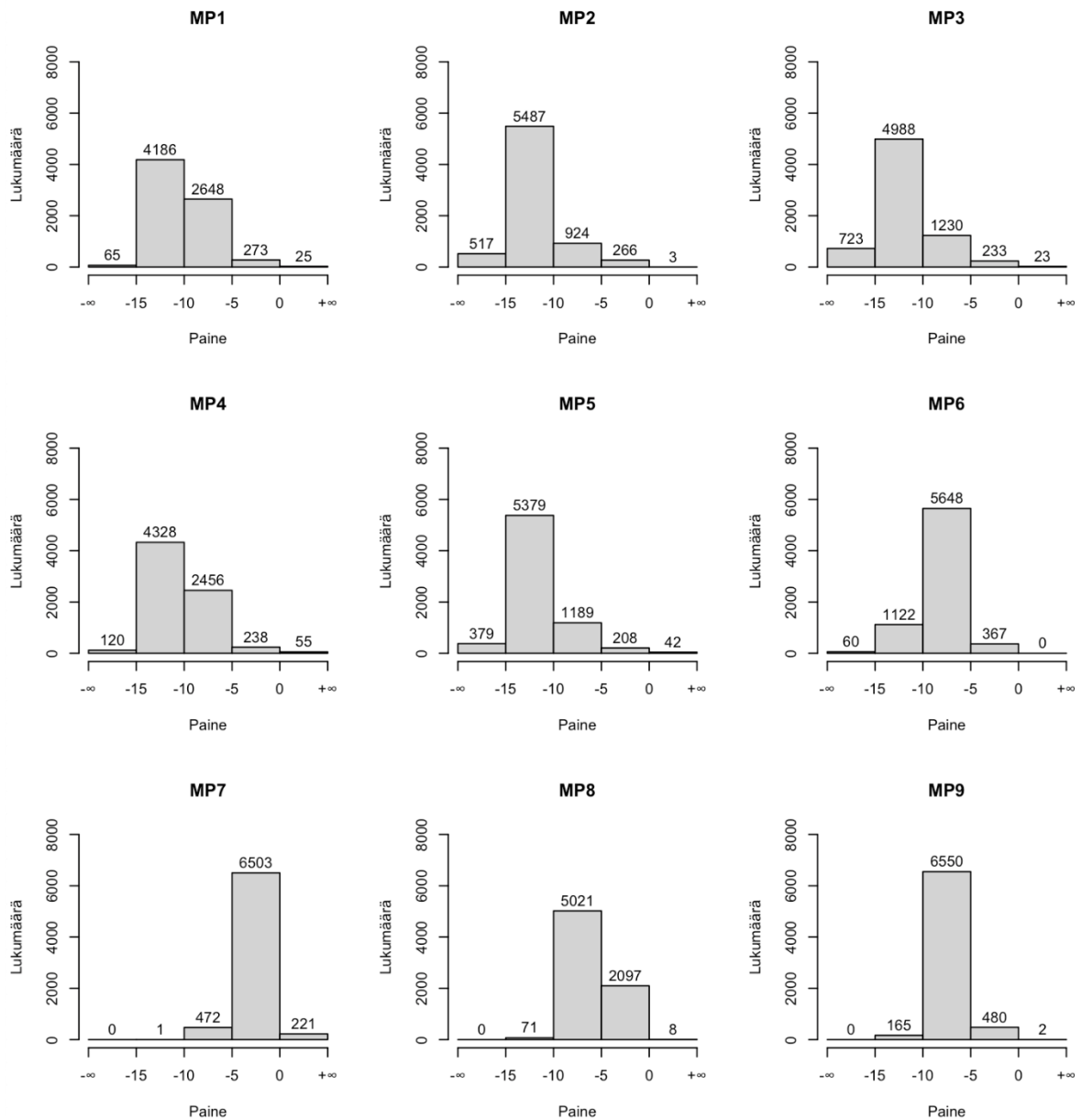
Taulukko 6. Tulokset kulutusjoustojaksolla

		Kaikki	Alin kerros	Keski-kerros	Ylin kerros
Kaikki (Pa)	Keskiarvo	-7,1	-9,5	-8,4	-4,8
Viikonloppu, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-5,5	-7,8	-6,3	-3,3
Yöaika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-6,7	-8,9	-7,4	-4,6
Seis-aika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-6,1	-8,4	-6,9	-4,0
	Minimi	-31	-31	-23	-29
	Maksimi	2,7	-0,5	1,5	2,7
Arkiaika, tuulisuodatettu (Pa)	Keskiarvo	-9,0	-11	-11	-6,1
	Mediaani	-9,2	-11	-11	-6,4
	Keskihajonta	4,0	3,4	2,8	2,8
	Minimi	-41	-31	-41	-29
	Maksimi	18	18	6,7	3,5
Ylipaineisten hetkien osuus		0,6 %			
Yli -30 Pa alipaine, osuus		0,0 %			
Yli -15 Pa alipaine, osuus		6,7 %			

Kuvassa 11 on esitetty histogrammit jokaiselle mittauspisteelle. Alimman kerroksen mittauspisteillä MP 1–3 esiintyy melko suurta alipainetta. Mittauksista suurin osa on -15...-10 Pa välillä. Myös keskimmaisessä kerroksessa (MP4–5) esiintyy kohtuullisen suurta alipainetta, esiintymiä on eniten välillä -15...-10 Pa. Ylimmässä kerroksessa alipaineet jäävät alempia kerroksia keskimäärin pienemmiksi. Kolmella mittauspisteellä (MP6, MP8, MP9) esiintyy eniten paine-eroja välillä -10...-5 Pa. Mittauspisteellä MP7 esiintymiä on eniten välillä -5...0 Pa.

Kulutusjoustojaksolta tarkasteltiin myös esimerkkitorstaita, jolloin tuulen keskinopeus ei ylittänyt kertaakaan 5 m/s (kuva 12). Ulkolämpötilan vaihteluväli kyseisenä päivänä 22.9.2022 oli 2–10 °C. Rakennuksen käyttö näkyy muutoksina paine-eroissa vuorokauden aikana. Paine-erot käyttäytyivät hyvin samankaltaisesti kuin normaalijaksolla:

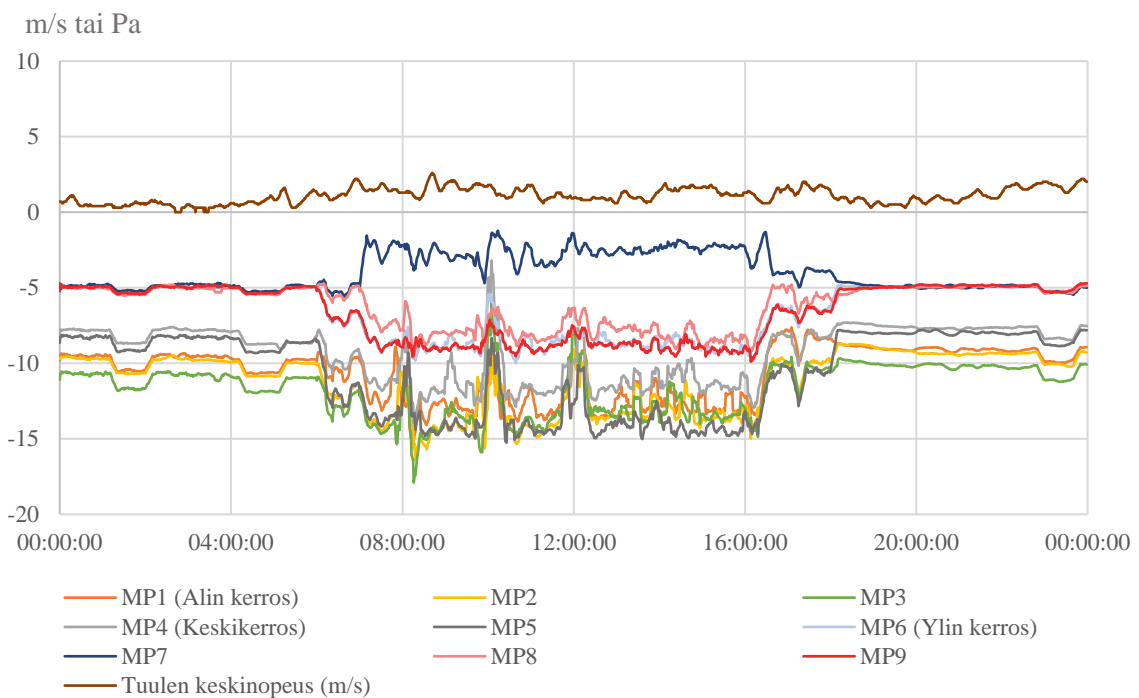
- Yöaikaan kohteen kaikissa mittauksissa on alipaine.



Kuva 11. Paineiden esiintymistiheys eri mittauspisteissä (MP1–MP9) kulutusjoustoajaksolla ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä tuulennopeuden ollessa maksimissaan 5 m/s

- TK353:n käynnistyessä alipaine ensin suurenee lyhyeksi aikaa, jonka jälkeen vielä pienenee hetkeksi kaikilla mittauksilla.
- Klo 7 käynnistyvät TK351 ja TK352 sekä WC-erillispoiston teho muuttuu. Alipaineen taso suurenee kaikilla muilla paitsi yhdellä mittauspisteellä (MP7).

- Päiväaikainen taso on kaikilla mittauksilla erilainen kuin käyttöajan ulkopuolinen taso. Yhdellä mittauksella on pienempi alipaine käyttöajalla kuin yöaikaan. Muilla mittauksilla päivällä alipaine suurenee.
- Ilmanvaihtokoneiden sammussa osassa mittauksia on havaittavissa hetkellinen voimakas alipaineen suureneminen.
- Mittauksista laskettu 10 minuutin liukuvan keskiarvo kaikilla mittauspisteillä koko päivän alipaineinen.
- Ylipaineita on vain vähän ja suurin mitattu ylipaine on 1,3 Pa.



Kuva 12. Paine-erojen liukuva 10 minuutin keskiarvo vähätuulisena torstaina 22.9.2022

Yhteensä uniikkeja alkaneita ylipainetilanteita oli kaikilla mittauksilla 356 kappaletta. Ajanhetkiä, joissa jokin tila oli ylipaineinen ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä, oli 0,6 %. Suurin lukumäärä erillisiä ylipainetilanteita, 195 kappaletta, oli mittauspisteessä MP7. Samalla mittauspisteellä oli myös pitkäjaksoisin ylipainetilanne, 6 minuuttia. Useimmiten ylipainetilanne kesti vain yhden mittauksen, eli noin minuutin. Vähiten ylipainetta oli

mittauspisteissä MP2, MP6 ja MP9. Suurin ylipaineen mittausarvo tutkimusjaksolla oli 18 Pa. Yli 5 Pa mitattuja ylipainetilanteita oli tuulisuodatettuna vain 3 kpl, joten ylipaineiden osuus oli kulutusjoustoajaksolla 0,0 %. Paine-eron keskihajonta kulutusjoustoajaksolla eri mittauspisteissä on esitetty taulukossa liitteessä 3. Yhdeksän mittauspisteen keskihajonta vaihteli välillä 1,5 Pa...4,2 Pa.

5.5 Tulosten arviointi

Alipaineet tutkitulla kohteella ovat suurempia kuin kirjallisuuskatsauksen perusteella asetettu tavoite. Kohteen paine-erot olivat käyttöajalla erilaiset kuin käyttöajan ulkopuolella. Ilmanvaihtokoneiden käynnistyminen suurentaa tilojen alipainetta yhtä poikkeustilaa lukuun ottamatta. Ilman tuulen vaikutusta paine-eron tulisi pysyä -10...+5 Pa välillä, mutta jo keskiarvo on tavoitetason alarajalla. Rakennus ei ole uusi eikä sen tiiveyttä ole mitattu, mutta suurta alipainetta ei suositella vanhempiinkaan rakennuksiin.

Paine-eromittausten jakaantumista havainnollistettiin histogrammien (kuvat 9 ja 11) avulla. Eri mittauspisteissä paine-erojen käyttäytyminen oli hyvin samankaltaista kummallakin mittausjaksolla. Mittauspisteellä 1 oli kulutusjoustoajaksolla hieman enemmän suurempia alipaineita kuin normaalijaksolla. Keskiarvossa ero on kuitenkin vain 0,3 Pa ja keskihajonta on molemmilla jaksoilla sama. Käytettyjen antureiden tarkkuus -10...+10 Pa:n mittausvälillä on samaa suuruusluokkaa, $\pm 0,31$ Pa. Tuloksista ei ole mahdollista vetää johtopäätöstä, että ero keskiarvoissa johtuisi kulutusjoustosta. Pienin ero yksittäisten mittauspisteiden keskihajonnoissa normaali- ja kulutusjoustoajaksojen välillä oli 0 Pa ja suurin 0,4 Pa. Merkittävää eroa keskiarvoissa tai keskihajonnassa ei havaittu jaksojen välillä.

Ylipainetilanteissa korostui ylimmän kerroksen yksi tila, jonka säätö oli muihin tiloihin nähden erilainen. Tilan alipaine oli suurempi yöllä ja päiväaikana alipaine pieneni, toisin kuin muissa tiloissa. Pitkäaikaisia ylipainetilanteita ei havaittu missään mittauspisteessä kummallakaan mittausjaksolla, ja lyhyissä ylipainetilanteissa tuulenoisuus ylitti keskiarvon. Kulutusjousto ei tutkitulla kohteella aiheuttanut haitallista ylipaineen lisäystä. Kohteella oli tarkoitus tutkia myös ilmamääräsäätimillä varustettua tilaa. Ilmamääräsäätimillä havaittiin mittausdatasta kuitenkin säätöongelma, joka ei liittynyt kulutusjoustoan. Mittausdatasta tarkasteltuna kulutusjousto ei kuitenkaan lisännyt ylipaineita ilmamääräsäädetyssä tilassa.

Rakennusautomaatiojärjestelmästä tuotettu mittausdata saatiin vain 6 minuutin tarkkuudella pyydetyn yhden minuutin tarkkuuden sijaan, mikä heikentää datasta tehtävissä olevan analyysin arvoa. Kulutusjoustopyynti voi muuttua 10 sekunnin välein, mutta mittaukset tallennettiin tutkimusta varten 1 minuutin välein. Näytevälin pienentäminen voi vaikuttaa esimerkiksi keskihajontaan.

Työn tulokset viittaavat siihen, että kulutusjousto ei hyvin toteutettuna vaikuta negatiivisesti paine-eroihin rakennuksen ulkovaipan yli. Kohteella riittävän hyvin säädetty ilmanvaihtojärjestelmä todennäköisesti takasi tässä tapauksessa positiivisen tuloksen. Ilmanvaihtojärjestelmät ovat nykyisin monimutkaisia kokonaisuuksia, jotka tulee suunnitella ja säätää hyvin, jotta painesuhteiden hallinta onnistuu. Tutkittavalla kohteella ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus ja säätötyö oli tehty ennen mittauksia, minkä takia myös kulutusjoustokäytöllä ilmanvaihtojärjestelmä toimi hyvin. Alangon raportissa (2021) kerrotaan, että osatehokäytöllä painesuhteiden hallitseminen saattaa olla hankalampaa kuin mitoitusohjelmalla. Osateholla ilmavirtoja ei säädetä ja tarkistusmitataankin harvemmin. Alangon (2018) tutkimuksessa käytön ulkopuolista ilmanvaihtoa ei ollut useissa kohteissa toteutettu hyvin. Eli heikko osatehon säätö on riski painesuhteille jo itsessään, ja tämä on riski myös kulutusjoustokäytölle siirtymiseen kohteilla. Huolellinen puhaltimien säätö on paine-erojen kannalta tärkeää.

6 Yhteenveto

Johdantoluvussa esiteltiin lyhyesti työn tarve ja tausta sekä tavoitteet, rajaus ja rakenne. Tarve kulutusjousto on lisääntynyt, ja sitä on tarpeen tutkia myös taloteknisestä näkökulmasta. Toisessa luvussa kuvattiin case-kohteena olevan rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä ja osallistuminen kulutusjousto. Tutkimuksen kohteena oli opetusrakennus, jonka ilmanvaihtojärjestelmät on kytketty kulutusjousto. Kullekin ilmanvaihtojärjestelmälle on määritetty tulo- ja poistokanavapaineille minimi- ja maksimirajat, joiden sisällä kulutusjousto pyynti voi vaihdella.

Kolmannessa luvussa käsiteltiin sähkönkäytön muutosta, ja esiteltiin kulutusjoustomarkkinat Suomessa sekä käsiteltiin kulutusjousto käyttöä talotekniikassa ja tarkemmin ilmanvaihdossa. Sähköverkko on herkempi häiriöille, kun tuotantorakenne muuttuu, ja pyörivien massojen osuus tuotannossa pienenee. Kulutusjousto on yksi joustavuutta ja säädettävyyttä lisäävä ratkaisu. Kulutusjoustolla voi osallistua useille erilaisille markkinoille. Kun kulutusjousto kytetään osaksi ilmanvaihtojärjestelmien ohjausta, tulee rakennuksen terveysturvallisuus ottaa huomioon. Kulutusjousto käytössä ilmanvaihtokoneiden tehoa säädetään normaalitasosta ylös- tai alaspäin pyynnin mukaisesti. Ilmanvaihdon yhteydessä voi olla myös jäädytys- ja lämmityslaitteita, jotka voivat olla sähkökäyttöisiä, jolloin ne vaikuttavat järjestelmän sähkötehoon. Käyttäjän näkökulmasta myös ilmamäärän muuttuminen vaikuttaa olosuhteisiin, ja esimerkiksi hiilidioksidipitoisuus ei saa nousta liian korkeaksi. Ilmanvaihdon hyödyntämistä kulutusjousto käytössä rajaa olosuhteet eri tavoin riippuen ilmanvaihtojärjestelmän toteutuksesta.

Neljännessä luvussa käsiteltiin kiinteistön painesuhteiden muodostumista ja paine-erojen vaikutuksia, ja lisäksi esiteltiin kirjallisuuden tavoitearvoja paine-erolle rakennusvaipan yli ja paine-eron mittaustapoja. Kiinteistöjen painesuhteisiin vaikuttaa tuulennopeus ja -suunta, ulkolämpötila, ulko- ja sisärakenteiden tiiveys, ilmanvaihtojärjestelmän toiminta sekä rakennuksen käyttö. Rakennuksen ulkorakenteen ja ilmanvaihdon ohjauksen tulee olla sellaiset, ettei rakenteille muodostu liiallista kosteusrasitusta. Tavanomaisissa rakennuksissa tulee välttää liiallista alipaineisuutta sekä pitkäaikaisia ylipainetilanteita. Aikaisemmin rakennukset suunniteltiin hieman alipaineisiksi. Uusien rakennusten ollessa aikaisempaa tiiviimpiä

perinteisillä ilmanvaihdon suunnittelutavoilla muodostuu rakennuksiin liian suuria alipaineita. Tiiviissä rakennuksissa on tavoitteena aikaisempaa selvästi pienempi alipaine, ja myös vanhemmissa rakennuksissa tulisi välttää liian suurta alipainetta. Asumisterveysasetuksen mukaan -15 Pa suuremman alipaineen syy tulee selvittää.

Ilmanvaihdon ilmavirtamittaukset eivät ole tarpeeksi tarkkoja, että rakennuksen painesuhdet voitaisiin hallita riittävän hyvin. Paine-eromittausten merkitys ilmanvaihdon toiminnan varmistamisessa tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa. Ilmanvaihdon ilmavirtojen säätötyön yhteydessä olisi suositeltavaa tehdä paine-erojen seurantamittaus, jonka tulosten perusteella ilmavirrat tulee hienosäätää. Rakennuksiin on mahdollista asentaa kiinteitä paine-eromittauksia, jotka tuodaan rakennusautomaatioon tarkasteltaviksi ja niille voidaan luoda hälytysrajat viiveineen tuulen ja paine-eron keskiarvoihin perustuen. Uusiin ja tiivistyskorjattuihin rakennuksiin on suositeltavaa asentaa kiinteät paine-eromittaukset rakennusvaipan yli. Terveetkin rakennukset hyötyvät paine-erojen seurannasta, jolla voidaan minimoida riskejä. Paine-eromittauksia ilmanvaihtojärjestelmien säätävinä antureina on myös tutkittu.

Nykyaikaisen tiiviin opetusrakennuksen rakennusvaipan yli mitatun paine-eron tavoitetaso ilmanvaihdolle on -5...+5 Pa. Paine-erojen tulisi pysyä -10...+5 Pa:n välillä ilman tuulen vaikutusta. Erilaisiin tiloihin tulisi miettiä käyttötavan mukainen tavoitetaso. Paine-eron mittaamiseen liittyy virhelähteitä. Kun halutaan selvittää rakennuksen yleinen paine-eron taso, tulee ulko-ovet ja ikkunat olla suljettuina ja mittaukset tulisi tehdä mahdollisimman vähätuulisena ajankohtana, jolloin ulkolämpötila ei ole erityisen kylmä. 1–2 viikon pituiseen seurantamittaukseen tulee sisällyttää viikonloppu. Tuulen ja sateen vaikutukseen voi vaikuttaa yhteen sijoittelulla ja sääsuojauksella. Kattavan kuvan saamiseksi tulee paine-eroja mitata useasta mittauspisteestä.

Viidennessä luvussa esiteltiin diplomityötutkimuksen mittausjärjestelyt. Mittaukset toteutettiin opetusrakennuksen tavanomaisen käytön aikana syys-lokakuussa 2022. Paine-eroja mitattiin seurantamittauksena ensin kaksi viikkoa ilman kulutusjoustoja ja sitten kaksi viikkoa kulutusjouston ollessa käynnissä. Mittauksia suoritettiin langattomilla paine-erolähettimillä rakennuksen kaikissa kolmessa kerroksessa eri ilmansuuntiin yhteensä yhdeksässä mittauspisteessä. Lisäksi dataa kerättiin rakennusautomaatiojärjestelmästä ja Ilmatieteenlaitokselta.

Kuudes luku käsitteli mittausten tuloksia. Kulutusjoustojaksolla kanavapaineet olivat ilmanvaihtokoneilla keskimäärin 8–10 % tavanomaista pienemmät. Tuuliolosuhteet olivat kahdella tutkimusjaksolla samankaltaiset. Ulkolämpötila oli normaalijaksolla hieman lämpimämpi kuin kulutusjoustojaksolla. Arki-aikaan ilmanvaihtokoneiden ollessa käynnissä ja tuulisuodatettuna keskimääräinen paine-ero oli normaalijaksolla -9,3 Pa ja kulutusjoustojaksolla -9,0 Pa. Keskiarvon lisäksi paine-erojen käyttäytymistä kohteella kuvaa paine-erojen keskihajonta, joka laskettiin kullekin mittauspisteelle normaali- ja kulutusjoustokäytöille erikseen. Pienin ero mittauspisteiden paine-eron keskihajonnoissa normaali- ja kulutusjoustojaksojen välillä oli 0 Pa ja suurin 0,4 Pa. Erot myös keskihajonnassa jäivät hyvin pieniksi mittaustarkkuuteen verrattuna. Tulosten perusteella kulutusjousto ei vaikuttanut paine-eroihin kohteella. Rakennuksen ilmanvaihdon säätö ja kulutusjouston toteutus oli kyseisellä kohteella tehty siten, että kulutusjoustokäytöllä ei ollut tässä tutkimuksessa huomattavissa eroja paine-eroissa ja niiden vaihtelussa.

7 Jatkotutkimusaiheet

Työ tehtiin tapaustutkimuksena ja tutkimuskohteena mittauksissa oli vain yksi rakennus. Tämän takia ei ole yleistettävissä, että kulutusjoustoilla ei missään rakennuksessa ole vaikutusta paine-eroihin rakennusvaipan yli, varsinkin puutteellisesti toteutettuna. Jatkossa on syytä tutkia useampia erilaisia rakennuksia. Työn tuloksista on kuitenkin mahdollista todeta, että kulutusjousto ei välttämättä vaikuta negatiivisesti paine-eroihin rakennuksen ulkovaipan yli. Kohteella riittävän hyvin säädetty ilmanvaihtojärjestelmä todennäköisesti takasi tässä tapauksessa positiivisen tuloksen. Ilmanvaihtojärjestelmät ovat nykyisin monimutkaisia kokonaisuuksia, jotka tulee suunnitella ja säätää hyvin, jotta painesuhteiden hallinta onnistuu.

Huolellinen rajojen valitseminen on kulutusjoustoos osallistuville ilmanvaihtokoneille tärkeää, sillä liian löyhät rajat voivat vaikuttaa energiatehokkuuteen tai olosuhteisiin huonontavasti. Olosuhteiden näkökulmasta suurempi säätövara vaikuttaa erilaisissa kytkennöissä eri tavalla esimerkiksi tuloilman lämpötilaan. Liian alhainen tuloilman lämpötila tai liian suuri nopeus aiheuttaa käyttäjille vedontunnetta (esim. Alanko 2020). Kaikilla tuloilmalaitteilla heittopituus ei pysy vakiona erilaisilla ilmavirroilla (Jokinen et al. 2014, 232). Näitä asioita ei tutkittu tässä työssä tarkemmin.

Kun ilmanvaihtoa kytketään kulutusjoustoos, on arvontuoton lisäksi kunkin rakennuksen ja laitteen sopivuus teknisestä näkökulmasta mietittävä tarkasti. Kun samaa tehomuutosta varten otetaan useampia laitteita, saadaan joustavuutta, mutta pienentämällä kapasiteettia pienennetään myös korvausta laitetta kohden. Kulutusjouston pyynnit voivat ajoittain olla ristiriidassa ilmavaihdon ensisijaisten tavoitteiden kanssa. Ilmanvaihto on kuitenkin ensisijaisesti käyttäjiä varten, ja hyvät sisäilmaolosuhteet tulee taata käyttäjille. Ilmanlaadun perässä säätyvät ilmanvaihtokoneet, kun tehostustarve on mittausten perusteella päällä, ei voi osallistua täydellä kapasiteetilla kulutusjoustoos vaikuttamatta myös olosuhteisiin. Suomalaisessa kylmässä ilmastossa on ilmanvaihtokoneilla käytössä yleisesti myös pakkaspudotuksia, jotka vaikuttavat puhallintehoihin suoraan ulkoilman lämpötilan mukaan. Tällöin pyyntivara alaspäin pienenee. Pakkasella on usein kova kysyntä sähköstä, eli pyynti tulisi todennäköisesti alaspäin, mutta pudotusvaraa ei näissä tilanteissa enää turvarajojen sisällä ole yhtä paljon.

Kulutusjousto on aiheena ajankohtainen, eikä kaikkea sen toiminnassa ole vielä tutkittu. Esimerkiksi kulutusjoustoon liitettävän laitteiston lisäkulumista ei ole tutkittu. On mahdollista, että kulutusjousto aiheuttaa laitteille ylimääräistä säätöä siten, että ne kuluvat tavanomaista käyttöä nopeammin. Jatkuvan tehonsäädön vaikutuksia laitteiden elinkaareen ja huoltokustannuksiin voisi selvittää esimerkiksi laitetoimittajilta.

Paine-eroja tarkasteltiin työssä vain rakennusvaihan yli. Eri tilojen välisiä paine-eroja ei mitattu, ja tämä olisi mielenkiintoista tutkittavaa jatkossa. Tarkastelun ulkopuolelle jäivät myös esimerkiksi ilmanvaihtokanavistoissa eri haaroissa tapahtuvat muutokset. Työssä ei ole myöskään analysoitu, poikkeavatko tutkimusajanjaksolle osuneet kulutusjouston pyynnit keskimääräisistä markkinan pyynneistä.

Lopuksi on vielä painotettava, että kiinteistö tulee tuntea kulutusjousto lisättäessä ja kirjallisuuskatsauksen perusteella kiinteistön paine-eroja on aiheellista seurata. Työn tulosten perusteella rakennusten omistajia suositellaan ensinnäkin pitämään huolta ilmanvaihtojärjestelmän säännöllisestä säätämisestä, mikä on erittäin tärkeä asia jo rakennuksissa ilman ilmanvaihdon kulutusjousto. Kulutusjousto on yksi tekijä, jonka myötä ilmanvaihtojärjestelmät monimutkaistuvat, ja paine-eron seurantamittausten suorittaminen säätötöiden jälkeen tai kiinteiden mittausten asentaminen uusiin rakennuksiin muuttuu entistä tärkeämmäksi. Kuitenkaan itse kulutusjousto ei hyvin toteutettuna aiheuta ongelmia kohteen rakennusvaihan yli mitattavissa paine-eroissa, vaan varsinaisen riskin aiheuttavat alun perin huonot säädöt kohteen ilmanvaihdossa. Ilmanvaihdon säätö tulee tehdä huolella, että riskejä merkittävästi pienennetään. Aikaisempaan yleiseen käytäntöön, jossa ilmamäärät säädetään ja mitataan vain mitoitusteholla, tulisi lisätä tarkastusmittaukset myös osatehoilla. Tulosten perusteella voi myös suositella kiinteää paine-eromittausta kohteisiin, joihin lisätään kulutusjousto ilmanvaihtoon.

Lähteet

A 545/2015 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydel-
lisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.

A 1009/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta ja perustelumuistio.

ABB. 2022. Understanding the effects of variable speed drives on motors. ABB drives. Viitattu: [16.11.2022]. Saatavissa: <https://new.abb.com/drives/segments/motors-and-drives-in-potentially-explosive-atmospheres/effects-of-variable-speed-drives-to-motors>

Alanko A. 2021. Ilmanvaihdon toiminnanvarmistus ja paine-eroseuranta Senaatti-kiinteistöissä. SEN/299/2020. Senaatti-kiinteistöt.

Alanko A. 2018. Ilmanvaihdon käyttötapojen ja käyttötasojen vaikutus sisäilmaan koulurakennuksissa. Opinnäytetyö, UEF Aducate Itä-Suomen Yliopisto. Rakennusterveysasiantuntijan koulutus.

Beil I., Hiskens I. A. ja Backhaus S. 2015. Round-trip efficiency of fast demand response in a large commercial air conditioner. *Energy and Buildings*. 97: 47–55.

Bessa R., Moreira C., Silva B. ja Matos M. 2019. Handling renewable energy variability and uncertainty in power system operation. Teoksessa: *Advances in energy systems: The large-scale renewable energy integration challenge*. Toim. Lund P.D., Byrne J., Haas R. ja Flynn D. John Wiley & Sons Ltd., 3–26.

Bessa R., Moreira C., Silva B. ja Matos M. 2014. Handling renewable energy variability and uncertainty in power systems operation. *Wiley interdisciplinary reviews. Energy and environment*. 3(2): 156–178.

Bikdeli E., Islam M. R., Rahman M. M. ja Muttaqi K. M. 2022. State of the Art of the Techniques for Grid Forming Inverters to Solve the Challenges of Renewable Rich Power Grids. *Energies (Basel)*. 15(5): 1879. Web.

Björkroth M. ja Eskola L. 2021. Tiiviiden asuinrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohje paine-erojen hallintaan. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

Björkroth M. ja Eskola L. 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohjeprojektin loppuraportti - (kommenttiluonnos).

Björkroth M., Eskola L., Vinha J. ja Kosonen R. 2020. Rakennusten sisä- ja ulkoilman välisen staattisen paine-eron tavoitetaso.

Edilex. 2022. Rakentamismääräykset – Kumotut. Viitattu: [22.11.2022]. Saatavissa: <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset/kumotut>

- Fingrid. n.d.a. Johdanto sähkömarkkinoihin. Viitattu: [20.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>
- Fingrid. n.d.b. Pohjoismainen tasehallinta. Viitattu: [20.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/>
- Fingrid. n.d.c. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). Viitattu: [25.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatotarjoukset>
- Fingrid. 2022a. Kysyntäjousto. Viitattu: [26.05.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pilottihankkeita/kysyntajousto/>
- Fingrid. 2022b. Reservimarkkinat. Viitattu: [15.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko>
- Fingrid. 2022c. Sähkömarkkinoiden kehityshankkeet. Viitattu: [20.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/>
- Fingrid. 2022d. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. Viitattu: [14.7.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase>
- Fingrid. 2022e. Säättökapasiteettimarkkinat uudistuvat viikkohankinnasta tuntimarkkinoiksi 1.12. alkaen. Viitattu: [18.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/saatokapasiteettimarkkinat-uudistuvat-viikkohankinnasta-tuntimarkkinoiksi-1.12.-alkaen/>
- Fingrid. 2022f. Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). Viitattu: [25.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>
- Fingrid. 2022g. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). Viitattu: [20.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi>
- Fingrid. 2021. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2022–2031 on julkaistu. Viitattu: [08.11.2022]. Saatavissa: <https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2022-2031-on-julkaistu.html>
- Fingrid. 2018. Mitä on inertia? Fingrid-lehden artikkeli. Viitattu: [08.11.2022]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>
- Fingrid. 2017. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden raportti aggregoinnista reservimarkkinoilla julkaistu. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2017/pohjoismaisten-kantaverkkoyhtioiden-raportti-aggregoinnista-reservimarkkinoilla-julkaistu/>
- Holm, J. Henkilökohtainen tiedonanto, Siemens, sähköposti [14.9.2022].

Ilmatieteenlaitos. N.d.a. Open data. Viitattu: [15.10.2022]. Saatavissa: <https://open-data.fmi.fi/wfs?request=GetCapabilities>

Ilmatieteenlaitos. N.d.b. Avoin data. Viitattu: [15.10.2022]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kysymyksiä-avoimesta-datasta#5>

Ilmatieteenlaitos. 2022a. Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat. Viitattu: [15.10.2022]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat>

Ilmatieteenlaitos. 2022b. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. Viitattu: [21.12.2022]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Järventausta P., Repo S., Trygg P., Rautiainen A., Mutanen A., Lummi K., et al. 2015. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli) – Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos.

Jokinen L., Pessi P. ja Laine T. 2014. Esimerkkejä tavanomaisten ilmastointilaitosten suunnittelusta. Teoksessa: Ilmastointitekniikka: Osa 1, sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Toim. Heinonen J. ja Sandberg E., 319–364.

Kang J., Wei Y., Liu L., Han R., Yu B. ja Wang J. 2020. Energy systems for climate change mitigation: A systematic review. Applied Energy. 263: 114602. Web.

Kuntien sisäilmaverkosto 2019. Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuiotio. Kuntien sisäilmaverkosto.

Kuusela H. 2020. Ilmanvaihdon ylipaineistamisen vaikutukset koulurakennuksen vaipparakenteisiin. Rakennusterveyden opinnäytetyö, Itä-Suomen yliopisto.

L 19.8.1994/763 Terveydensuojelulaki.

Lu N. 2012. An Evaluation of the HVAC Load Potential for Providing Load Balancing Service. IEEE Transactions on Smart Grid. 3(3): 1263–1270.

Lu X., Adetola V. ja O'Neill Z. 2021. What are the impacts on the HVAC system when it provides frequency regulation? – A comprehensive case study with a Multi-Zone variable air volume (VAV) system. Energy and buildings. 243: 1–19.

Maasoumy M., Sanandaji B. M., Sangiovanni-Vincentelli A. ja Poolla K. 2014. a. Model Predictive Control of Regulation Services from Commercial Buildings to the Smart Grid. 2014 American Control Conference.

Maasoumy M., Rosenberg C., Sangiovanni-Vincentelli A. ja Callaway D. S. 2014. b. Model predictive control approach to online computation of demand-side flexibility of commercial buildings HVAC systems for Supply Following. 2014 American Control Conference.

Motiva. 2022. Sähkön kulutusjousto. Viitattu: [23.05.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/sahkon_kulutusjousto

- Pietiko. N.d. MIRAN DLS langaton dataloggeri – Käyttöohje (FI). Saatavissa: <https://www.pietiko.fi/wp-content/uploads/MIRAN-DLS-Kayttoohje-FI.pdf>
- Pitkäranta M. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75517>
- RakMK D2/1987. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 1987. Kumottu.
- RakMK D2/2003. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Määräykset ja ohjeet 2003. Kumottu.
- Sandberg E. ja Ripatti H. 2014. Ilmanvaihtojärjestelmät. Teoksessa: Ilmastointiteknikka. osa 1, sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Toim. Heinonen J. ja Sandberg E., 113–128.
- Säteri J. ja Koskela H. 2014. Sisäilmasto. Teoksessa: Ilmastointiteknikka. osa 1, sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: Perustietoa ilmastointiteknikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Toim. Heinonen J. ja Sandberg E., 37–79.
- Sisäilmayhdistys. N.d. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Viitattu: [08.08.2022]. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>
- Sisäilmayhdistys. 2008. Ilmavirtaus ja paine-ero. Viitattu: [08.11.2022]. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Rakennustekniset-tutkimukset/Ilmavirtaus-ja-paine-ero>
- Talotekniikkainfo (Talotekninen teollisuus ja kauppa ry). 2021. Sisäilmasto ja ilmanvaihto. Viitattu: [25.8.2022]. Saatavissa: <https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>
- TEM. 2021. Elinkeinoministeri Mika Lintilä: Ilmasto- ja energiastrategia painottaa päästö- tontä energiaa ja teollisia investointeja. Viitattu: [26.05.2022]. Saatavissa: <https://tem.fi/blogi/-/blogs/elinkeinoministeri-mika-lintila-ilmasto-ja-energiastrategia-painottaa-paastotonta-energiaa-ja-teollisia-investointeja->
- Tuominen E., Laukkarinen A., Kauppinen A., Raunima T. ja Vinha J. 2019. COMBI-hankkeen paine-eromittausten yhteenveto. Julkaisussa: Vinha J & Raunima T. 2019. Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. Seminaarijulkaisu 6, osa 1(2), 28.–30.11.2019 Tampere.
- Valvira 2018. Ohje koulun ja päiväkodin olosuhdevalvontaan, terveyshaitan ennaltaehkäisemiseen sekä selvittämiseen.
- Valvira 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje.
- Vinha J., Korpi M., Kalamees T., Jokisalo J., Eskola L., Palonen J., et al. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos.

Vrettos E., Oldewurtel F. ja Andersson G. 2016. Robust Energy-Constrained Frequency Reserves From Aggregations of Commercial Buildings. *IEEE Transactions on Power Systems*. 31(6): 4272–4285.

Vrettos E., Kara E. C., MacDonald J., Andersson G. ja Callaway D. S. 2018. Experimental Demonstration of Frequency Regulation by Commercial Buildings-Part II: Results and Performance Evaluation. *IEEE transactions on smart grid*. 9(4): 3224–3234.

Wang S. ja Tang R. 2017. Supply-based feedback control strategy of air-conditioning systems for direct load control of buildings responding to urgent requests of smart grids. *Applied Energy*. 201: 419–432.

Wu X., He J., Xu Y., Lu J., Lu N. ja Wang X. 2018. Hierarchical Control of Residential HVAC Units for Primary Frequency Regulation. *IEEE transactions on smart grid*. 9(4): 3844–3856.

Liite 1. MIRAN DLS IAQ.THB+CO2+DP -anturin tekniset tiedot

Liite 1. MIRAN DLS IAQ.THB+CO2+DP -anturin tekniset tiedot

Laitteen malli	MIRAN DLS IAQ.THB+CO2+DP (G2)	
Anturi (IAQ.THB antureiden lisäksi):	Mittausalue	Tarkkuus
-Hiilidioksidipitoisuus (CO ₂)	0..5000 ppm	±30 ppm tai ±3 % mitattavasta arvosta
-Paine-ero	±500 Pa	±3 % mitattavasta arvosta 0-pistetarkkuus ±0,1 Pa
Mittausväli	Kiinteä	
-Hiilidioksidipitoisuus (CO ₂)	20 s	
-Paine-ero	10 s	
Paineletkun pituus	2 m (maksimipituus) Huom! minimi läpivientiputken sisähalkaisija 2,5 mm ja tällöin maksimipituus 30 cm	
Virtalähde	3,6 V Litium-paristo	
Paristonkesto	n. 1,5 vuotta	
Kalibrointi	Paine-eroanturi tehdaskalibroitu anturivalmistajan toimesta. CO ₂ anturin offset-kalibroidaan 400 ppm pitoisuudessa tuotannossa. Lisäksi mahdollisuus puoliautomaattiseen offset kalibrointiin, katso kohta 6.5 Kalibrointi	
Suosittelava kalibrointiväli	6-12 kk (CO ₂) 1 vuosi (paine-ero)	

Liite 2. Mittaustulokset normaalijaksolla

Normaalijaksolla	Kaikki	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9
Kaikki (Pa)	-7,8	-8,7	-9,9	-11	-8,5	-9,0	-6,4	-4,0	-5,8	-6,1
Keskisarvo										
Viikonloppu, tuulisuodatettu (Pa)	-6,6	-7,8	-8,1	-8,7	-6,7	-7,1	-5,0	-4,6	-5,2	-4,9
Keskisarvo										
Yöaika, tuulisuodatettu (Pa)	-7,2	-8,3	-9,1	-11	-7,8	-7,5	-5,4	-4,5	-5,2	-4,8
Keskisarvo										
Seis-aika, tuulisuodatettu (Pa)	-6,9	-8,1	-8,7	-9,7	-7,3	-7,3	-5,2	-4,5	-5,2	-4,9
Minimi	-5,4	-22	-34	-54	-25	-19	-26	-10	-21	-20
Maksimi	4,7	-1,6	-1,4	-2,0	-3,1	4,7	4,7	0,9	4,4	0,4
Keskisarvo										
Arki-aika, tuulisuodatettu (Pa)	-9,3	-9,7	-12	-12	-10	-12	-8,5	-2,8	-6,8	-7,8
Mediaani	-9,6	-9,8	-12	-12	-11	-12	-8,5	-2,6	-7,0	-8,0
Keskiahajonta	3,8	2,7	3,0	3,8	2,9	2,6	2,3	1,7	2,0	1,7
Minimi	-5,4	-23	-33	-54	-32	-24	-33	-13	-19	-20
Maksimi	8,4	8,4	0,4	6,9	7,2	7,9	-0,9	2,9	5,4	0,0
Ylipaineisten hetkien osuus	0,6%	1,1%	0,0%	0,7%	0,5%	0,4%	0,0%	3,0%	0,1%	0,0%
Yli +5 Pa ylipaine, osuus	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Yli -30 Pa alipaine, osuus	0,7%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Yli -15 Pa alipaine, osuus	9,2%	0,7%	3,5%	3,5%	1,7%	2,6%	0,8%	0,0%	0,1%	0,1%

Liite 3. Mittaustulokset kulutusjoustojaoksolla

Kulutusjoustolla	Kaikki	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9
Kaikki (Pa)	-7,1	-8,8	-9,6	-10	-8,2	-8,6	-5,7	-3,4	-4,8	-5,2
Viikonloppu, tuulisuodatettu (Pa)	-5,5	-7,4	-7,7	-8,2	-6,3	-6,4	-3,5	-3,0	-3,4	-3,4
Yöaika, tuulisuodatettu (Pa)	-6,7	-8,4	-8,8	-9,6	-7,5	-7,4	-4,9	-4,4	-4,5	-4,4
Seis-aika, tuulisuodatettu (Pa)	-6,1	-7,9	-8,3	-9,0	-6,9	-7,0	-4,3	-3,8	-4,0	-3,9
Minimi	-31	-17	-31	-26	-23	-12	-21	-29	-22	-9,2
Maksimi	2,7	-0,5	-0,6	-0,8	1,5	-0,4	2,7	0,7	-0,1	2,6
Arki-aika, tuulisuodatettu (Pa)	-9,0	-10	-12	-12	-10	-12	-8,2	-2,7	-6,1	-7,4
Mediaani	-9,2	-11	-12	-12	-11	-12	-8,2	-2,6	-6,1	-7,4
Keskiahajonta	4,0	2,7	2,8	4,2	2,8	2,7	2,2	1,5	1,9	1,5
Minimi	-41	-23	-25	-31	-41	-21	-29	-11	-14	-14
Maksimi	17	3,5	17,5	4,1	1,6	6,7	-0,8	2,4	2,1	3,5
Ylipaineisten hetkien osuus	0,6%	0,3%	0,0%	0,3%	0,8%	0,6%	0,0%	3,1%	0,1%	0,0%
Yli +5 Pa ylipaine, osuus	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Yli -30 Pa alipaine, osuus	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Yli -15 Pa alipaine, osuus	6,7%	0,4%	2,6%	3,8%	0,6%	1,9%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%