

Timo Marin

## **ASUINRAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN HALLINTA**

# ASUINRAKENNUKSEN PAINESUHTEIDEN HALLINTA

Timo Marin  
Opinnäytetyö  
Kevät 2023  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma YAMK  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma YAMK

---

Tekijä: Timo Marin

Opinnäytetyön nimi: Asuinrakennuksen painesuhteiden hallinta

Työn ohjaaja: Mikko Niskala

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2023

Sivumäärä: 90 + 2 liitettä

---

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Heatco Finland Oy, joka on suomalainen insinööritoimisto ja LVI-järjestelmien tukkutoimittaja. Työssä tutkittiin asuinrakennusten painesuhteiden hallintaa, toteutusratkaisuja ja niiden toimivuutta käytännön ympäristössä. Lähdeaineistona työssä käytettiin teorian ja käytännön mittaussosion perustana alan kirjallisuutta, viranomaisjulkaisuja, alan tutkimuksia ja rakentamisen lainsäädäntöä. Käytännön osan tutkimusmenetelmänä käytettiin jatkuvaa paine-eromittausta usean kuukauden ajalta sekä alan ammattilaisille kohdennettua kyselytutkimusta. Erilaisia sisä- ja ulkoilman väliseen paineeseen vaikuttavia tilanteita simuloitiin tavanomaisen asumisen yhteydessä käytännössä tavallisessa ja nykyaikaisessa asuinympäristössä. Tämän työn avulla tilaaja saa taustatietoa erilaisista suunnitteluratkaisuista ja niiden käytännön toimivuudesta. Työn avulla ohjataan LVI-suunnittelutyötä toimiviin ja suositeltaviin ratkaisuihin sekä tuodaan mahdollisia riskitilanteita esille.

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että erilaisten korvausilmaa vaativien tekijöiden suunnitteluun tulee perehtyä huolella ja korvausilma tulee toteuttaa riittävällä ratkaisulla. Puutteellinen korvausilmaratkaisu aiheuttaa sisä- ja ulkoilman välille herkästi haitallisen alipaineen. Rakentamisessa vallitsevat nykytrendit ratkaisuihin eivät välttämättä ole sellaisenaan toimivia, vaan vaativat kohdekohtaisen tarkastelun. Liiallinen tuloilman kompensointi ilmanvaihtokoneen tuloilmalla voi aiheuttaa LTO-laitteen jäätyksen. Tuloilman kompensointi muodostaa tietyissä tilanteissa rakennukseen yli-paineen, kun säätö tehdään vain yhtä tilannetta varten. Rakennuksen käyttöönottoaiheessa ilmanvaihdon säätötyö tulee tehdä huolella ja siihen käytettävä aika ja ajankohta tulee huomioida vallitsevien sääolosuhteiden mukaisesti.

Tulisijan ja liesituulettimen korvausilman puutteellinen toteutus voi aiheuttaa huomattavaa haittaa asumisessa. 160 mm:n korvausilmaventtiili moottoripellillä osoittautui toimivaksi ratkaisuksi monessa tilanteessa sellaisenaan tai lisänä muiden ratkaisujen rinnalla. Vakiopainesäätö asuinrakennuksen ilmanvaihtokoneen puhaltimien ohjauksessa on yleisesti vähän käytetty, mutta tutkimuksen perusteella se toimi varsin hyvin muuttuvassa painehäviöympäristössä. Yleisesti voidaan todeta, että mitä vähemmän asukas joutuu huomioimaan erilaisten toimintojen vaikutuksia tavallisessa asumisessa itse, sen paremmin painesuhteiden hallinta toimii oikein valituilla ratkaisuilla.

Painesuhteisiin vaikuttaa lopulta voimakkaimmin ja yhtäjaksoisesti pitkäkestoisimmin tuuli. Tuuleen ei pystytä käytännössä vaikuttamaan, mutta sen vaikutuksiin voidaan vaikuttaa kiinnittämällä huolellisuutta ulkovaipan tiiveyteen.

---

Asiasanat: paine-ero, ilmanvaihto, korvausilma, tuloilman kompensointi

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services

---

Author: Timo Marin

Title of thesis: Controlling the pressure difference between indoor and outdoor air in a residential building

Supervisor: Mikko Niskala

Term and year when the thesis was submitted: spring 2023

Number of pages: 90 + 2 appendices

---

This thesis was commissioned by Heatco Finland Oy. Heatco Finland Oy is an engineering office and a wholesale supplier of HVAC systems. The purpose of the study was to investigate the pressure difference between indoor and outdoor air in residential buildings.

Professional literature and construction-related legislation were used as sources. The research was done by measuring the pressure difference between indoor and outdoor air continuously for several months. In addition, a survey was conducted for HVAC professionals. The survey asked what has caused problem situations related to pressure differences.

In conclusion, replacement air for equipment that needs air in the building must be planned carefully. In the planning of each design project, the special requirements of the project in question must be taken into account. Ventilation adjustment work should be done in windless weather. It would be good to adjust the ventilation during a long-lasting measurement period. Of all factors, the wind has the strongest effect on the pressure difference. Also the fireplace, the range hood and the vacuum cleaner that removes the air affect the pressure difference.

The lack of replacement air in devices that remove air can cause a lot of problems. Replacement air for the range hood can be implemented by increasing the supply air from the ventilation machine when the range hood is in use. The replacement air valve can be controlled automatically with a motorized damper. The replacement air duct works well for many situations where replacement air is needed. The ventilation machine can be controlled by adjusting the duct pressure, so filter contamination is not a problem. The resident usually does not know how to use complex systems, so the automated implementation of replacement air often works better.

---

Keywords: Pressure difference, ventilation, compensation air, supply air compensation

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	LAINSÄÄDÄNTÖ .....	8
2.1	Rakentamismääräyskokoelma .....	8
2.2	Ilmanvaihtoasetus .....	8
2.3	Ääniympäristöasetus .....	9
2.4	Energiatehokkuusasetus .....	10
2.5	Asumisterveysasetus .....	10
2.6	Maankäyttö- ja rakennuslaki .....	11
2.7	Ohjeet ja tulkinnat .....	11
3	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT .....	13
3.1	Nykytilanne ja tilastoja .....	13
3.2	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto .....	14
3.2.1	Hajautettu tulo- ja poistoilmanvaihto .....	15
3.2.2	Keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihto .....	16
3.3	Ilmalämmitys .....	17
3.4	Koneellinen poistoilmanvaihto .....	19
3.4.1	Koneellinen poistoilmanvaihto ilman LTO:a .....	19
3.4.2	Koneellinen poistoilmanvaihto LTO:lla .....	22
3.5	Painovoimainen ilmanvaihto .....	23
3.5.1	Haasteet .....	23
3.5.2	Toimivuuden todentaminen .....	24
3.5.3	Arkkitehtisuunnittelu .....	24
3.5.4	Poistoilmahormi .....	24
3.5.5	Korvaus- ja siirtoilma .....	26
3.5.6	Painovoimaisen ilmanvaihdon tehostaminen .....	27
4	RAKENNUKSEN PAINESUHTEET .....	29
4.1	Ilmanvaihto .....	29
4.1	Tuulen vaikutus .....	30
4.2	Terminen paine-ero .....	33
4.3	Painejakauma tilassa .....	34
4.4	Yhteisvaikutus .....	36

4.5	Rakennuksen vaipan ilmatiiveys.....	37
4.6	Asuinrakennusten erityishuomiot.....	39
4.6.1	Liesituuletin.....	40
4.6.2	Tulisija.....	41
4.6.3	Keskuspölynimuri.....	43
4.7	Suunnitteluratkaisut.....	44
4.7.1	Painovoimainen korvausilma.....	44
4.7.2	Koneellinen korvausilma.....	48
4.7.3	Vakiopainesäätö.....	49
4.8	Paine-eromittaus.....	50
4.8.1	Mittalaitteet.....	50
4.8.2	Mittaaminen.....	51
4.8.3	Termisen paine-eron kompensointi.....	52
4.8.4	Paine-eron tavoitetasot.....	54
5	PAINESUHTEIDEN MITTAUKSET.....	55
5.1	Mittalaitteet.....	55
5.2	Mitattava kohde.....	56
5.3	Asuinpientalon mittaukset.....	59
5.3.1	Liesituuletin.....	59
5.3.2	Tulisija.....	61
5.3.3	Keskuspölynimuri.....	64
5.3.4	Tuuli.....	65
5.3.5	Painovoimaisen ilmanvaihdon venttiilit.....	69
5.3.6	Kylmät olosuhteet.....	71
5.3.7	Ilmanvaihtokoneen suodattimet.....	74
5.3.8	Ilmanvaihtokoneen vakiopainesäätö.....	76
5.3.9	Koneellinen tavanomainen ilmanvaihto.....	81
5.3.10	Yhtäaikainen käyttö.....	84
5.3.11	Kyselytutkimus.....	85
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	86
7	POHDINTA.....	89
	LÄHTEET.....	91
	LIITTEET.....	96

# 1 JOHDANTO

Suomessa rakennetaan yli 40 000 asuntoa vuosittain ja lähes kaikki rakennettavat uudet asunnot toteutetaan koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla ja lämmöntalteenotolla (1). Koneellisen ilmanvaihdon suunnittelu- ja säätötyöllä on suuri vaikutus koko rakennuksen elinkaareen ja asumisterveyteen. Huonosti suunniteltu ja toteutettu rakennuksen ilmanvaihto voi aiheuttaa pysyviä vaurioita rakenteille ja terveyshaittoja asukkaalle. Ilmanvaihdon suunnittelu ja toteutus vaikuttaa osatekijänä asunnon sisä- ja ulkoilman väliseen painesuhteeseen sekä ilman liikkeisiin rakenteissa ja rakennuksen sisällä. Painesuhteiden hallinta ei ole aivan yksinkertaista, kun huomioidaan sään ääriolosuhteet ja ilmanvaihtoon vaikuttavat komponentit ja käyttölaitteet kuten tulisijat ja erillispoistot. Rakentamista koskeva lainsäädäntö on muuttunut ja päivittynyt vuosien kuluessa useaan kertaan. Uusimman asetuspäivityksen mukaan erityissuunnittelijan tulee huomioida myös ulkoiset tekijät suunnitteluvaiheessa siten, ettei rakennuksen tai tilojen paineet muutu haitallisesti. (2.)

Työn tavoitteena on selvittää tilaajalle erilaisia ratkaisuja asuinrakennusten painesuhteiden hallintaan eri käyttötilanteissa sekä tutkia nykyisten käytössä olevien mallien toimintaa oikeassa käyttöympäristössä ja tunnistaa selkeimmät ongelmakohdat. Työ on teoriapainotteinen mutta sisältää kuitenkin käytännön mittauksia ja tulosten analysointia ja pohdintaa kunkin ratkaisun toimivuudesta. Työ päätettiin rajata koskemaan nykyrakennustekniikalla rakennettuja asuinrakennuksia, jotta työn laajuus pysyy tarkoituksenmukaisena.

Toimeksiantajana toimii maanlaajuisesti toimiva insinööritoimisto ja LVI-järjestelmien tukkutoimittaja Heatco Finland Oy. Yritys tekee LVIAS-suunnittelua pääasiassa pientalo-, asuntotuotanto- ja liike- ja hoivatilasegmenteissä. Suurimmaksi osaksi suunnittelu kohdentuu uudisrakentamiseen.

## 2 LAINSÄÄDÄNTÖ

Tässä osiossa käsitellään rakentamista ja sen ilmanvaihtoa koskevia tärkeimpiä lakeja ja säädöksiä. Osa lainsäädännöstä koskee ja ohjaa yleisesti rakentamista, ja osa kohdentuu selvästi ilmanvaihtoon ja sen hallintaan. Lainsäädäntö on aiemmin keskittynyt rakentamismääräyskokoelmaan, joka ei nykyisin ole enää voimassa mutta se tukee edelleen suunnittelua. (2.)

### 2.1 Rakentamismääräyskokoelma

Aiemmin rakentamista on ohjannut vahvasti rakentamismääräyskokoelman määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma on kuitenkin kumottu 31.12.2017, ja vastaavat sisällöt löytyvät 1.1.2018 alkaen ympäristöministeriön asetuksista. Uudet asetukset perustuvat varsin laajasti aiempiin määräyksiin ja ohjeisiin. Painovoimaisen suunnittelun ohjeet jäivät pois vuoden 1987 versioista, kun painovoimainen ilmanvaihto ei ollut enää yleinen ilmanvaihdon toteutustapa. Nykyisillä määräyksillä ilmanvaihdolle ja sisäilmastolle asetetut toiminnalliset ja olosuhdevaatimukset tulee täytyä kuitenkin kaikilla järjestelmillä. (3, s. 2.)

### 2.2 Ilmanvaihtoasetus

Ilmanvaihtoasetus eli ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta koskee uuden rakennuksen sisäilmaston ja ilmanvaihdon suunnittelua ja rakentamista. Asetus koskee myös rakennuksen laajennusta ja kerrosalaan laskettavan tilan lisäämistä. Asetusta ei kuitenkaan sovelleta maatalouden tuotantorakennuksen eikä sellaisen uuden asuinrakennuksen, joka on tarkoitettu käytettäväksi vähemmän kuin neljän kuukauden ajan vuodessa, suunnitteluun ja rakentamiseen. Lisäksi asetuksessa on määräyksiä ilmamäärästä, ilman virtaussuunnista, säädettävyydestä ja ohjauksesta, lämpötilaolosuhteista ja tuloilman suodatuksesta, ja määräyksiä on kohdistettu myös ilmanvaihtokanaviston ominaisuuksille. Asetuksen painovoimaista ilmanvaihtoa koskevista kohdista on koottu oppaan loppuun tarkastuslista. (3, s. 2.)

Nykyisin ilmanvaihdon suunnittelu perustuu suurimmilta osin ilmanvaihtoasetukseen. Asetuksessa on määräyspuolella jätetty paljon suunnittelijan harkinnan varaan. Valtakunnallisesti rakennusvi-

ranomaiset vaativat myös Talotekninen teollisuus ja kauppa ry:n piirissä toimivan sisäympäristöryhmän laatiman oppaan selvennyksiä ja ohjeita noudatettavan suunnittelussa tavanomaisissa tapauksissa. (8.)

Ilmanvaihtoasetuksessa otetaan kantaa myös painesuhteiden hallintaan. Asetuksen mukaan erityissuunnittelijan on suunniteltava rakennuksen ulko- ja ulospuhallusilmavirrat siten, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaineen vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan on tehtäviensä mukaisesti suunniteltava rakennuksen vaipan ja sisärakenteiden ilmanpitävyys ja hormivaikutuksen hallinta siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa ja vältetään rakenteissa olevien epäpuhtauksien, maaperässä olevien epäpuhtauksien ja radonin siirtymistä sisäilmaan ja vältetään kosteuden siirtymistä rakenteisiin. Erityissuunnittelijan on suunniteltava tulisijan ja erillispoistojen käytön vaatima lisäulkoilmavirran saanti siten, että rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä toimii hallitusti ja rakennuksen tai huonetilojen paineet eivät muutu haitallisesti. Asetuksen mukaan erityissuunnittelijan on siis huomioitava tulisijan ja erillispoistojen, kuten liesituulettimen vaatiman korvausilman toteutus suunnitelmissaan. (2.)

## 2.3 Ääniympäristöasetus

Ääniympäristöasetusta sovelletaan muiden rakennusten ohella myös asuinrakennuksiin. Asetuksen mukaan ulkovaipan ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava siten, että ääneneristys on vähintään 30 dB eikä impulssimaisen, kapeakaistaisen tai pienitaajuisen melun keskiäänitaso ylitä nukkumiseen tai lepoon käytettävissä huoneissa 25 dB:ä (5, s. 27). Asetuksessa myös määritellään taloteknisten laitteiden muodostaman äänen raja-arvoja erilaisissa tiloissa taulukon 1 mukaan.

TAULUKKO 1. Äänen raja-arvot erityyppisissä tiloissa (5, s. 27)

Huone- ja ulkotila	Jatkuva laajakaistainen ääni		Impulssimainen tai kapeakaistainen ääni	
	Keskiäänitaso $L_{Aeq,T}$ (dB)	Enimmäisäänitaso $L_{AFmax,T}$ (dB)	Keskiäänitaso $L_{Aeq,T}$ (dB)	Enimmäisäänitaso $L_{AFmax,T}$ (dB)
Asuin-, majoitus- tai potilashuone	28	33	25	30
Asunnon keittiö tai rakennuksen harastustila	33	38	30	35
Porrashuone tai uloskäytävä	38	43	35	40
Ulkotila	45	50	40	45

## 2.4 Energiatehokkuusasetus

Energiatehokkuusasetus eli Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta asettaa vaatimuksia uudelle rakennukselle rakennusosakohtaisten vaatimusten ja laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun (E-luvun) muodossa. E-lukuvaatimukset on asetettu rakennuksenkäyttötarkoitukseluokittain. E-lukuvaatimusta ei kuitenkaan sovelleta esimerkiksi: pienen asuinrakennuksen laajennukseen, loma-asumiseen suunniteltavaan pientaloon tai asuinkerrostalon ullakolle rakennettavaan asuntoon. E-luvun raja-arvoja ei sovelleta myöskään muiden rakennusten laajennuksiin tai kerrosalaan laskettavan tilan lisäämiseen, mikäli voidaan käyttää olemassa olevaa lämmitys- tai ilmanvaihtojärjestelmää. Rakennusosakohtaiset vaatimukset ovat kuitenkin voimassa aina kun rakennus on yli 50 m<sup>2</sup> tai laajennuksen kanssa kokonaisuus ylittää 50 m<sup>2</sup>. (6.)

Ilmanvaihto ja sen energiatehokkuus on merkittävässä osassa laskettaessa E-lukua. Ilmanvaihtojärjestelmien lämmöntalteenottolaitteistoissa on eroja toimintaperiaatteen ja hyötysuhteen osalta. Käytettäessä regeneratiivista lämmöntalteenottoa saavutetaan usein parempi vuosihyötysuhde, kuin ristivastavirtakennoisella lämmöntalteenotolla. Laskettaessa painovoimaisella ilmanvaihdolla toimivan rakennuksen vertailulämpöhäviötä poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen vertailuarvo on nolla. (6.)

Mikäli painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaa avustaa erillinen puhallin, sen sähkönkulutus lasketaan mukaan E-lukuun sen käyttöajan mukaisesti, joka tarvitaan laskennallisesti suunnitellun ilmavirran saavuttamiseen. Esimerkiksi jos puhallin on ajateltu avustavaksi vain kesäpäivinä, huomioidaan se vain niiltä osin, kun lämpötila keskimäärin vastaa kesäajan olosuhteiden lämpötilaa. (3, s. 2.)

## 2.5 Asumisterveysasetus

Asumisterveysasetuksessa otetaan kantaa myös ilmanvaihtoon ja sisäilmastoon terveydellisistä näkökulmista. Asetusta sovelletaan käytännössä terveysolosuhteiden valvontaan, esimerkiksi kun asunnossa epäillään merkittävää asumisesta aiheutuvaa terveyshaittaa. (3, s. 2.) Yleisesti asetus uuden rakennuksen ilmanvaihdosta ottaa huomioon samoja asioita, kun asumisterveysasetus. Asetuksessa otetaan kantaa myös oleskelualueen lämpötilaan, ilman virtausnopeuksiin, sisäilman

hiilidioksidipitoisuuteen, minimi ulkoilmavirtoihin, ilmanvaihtokertoimeen ja huoneilman kosteuteen. (7.)

## **2.6 Maankäyttö- ja rakennuslaki**

Maankäyttö- ja rakennuslaki koskee yleisesti rakentamista ja maankäyttöä sekä pieniltä osin myös ilmanvaihtoa. Maankäyttö- ja rakennuslaissa ilmanvaihtoa koskevat erityisesti vaatimukset paloturvallisuudesta, terveellisyydestä, käyttöturvallisuudesta, ääniolosuhteista, energiatehokkuudesta sekä käyttö- ja huolto-ohjeesta (8). Laki antaa rakennusvalvontaviranomaiselle mahdollisuuden myöntää vähäisen poikkeamisen rakennusluvan yhteydessä. Poikkeamisen myöntämisen edellytyksenä on, ettei poikkeaminen merkitse maankäyttö- ja rakennuslaissa rakentamiselle asetettujen keskeisten vaatimusten syrjäytymistä. Poikkeamista voisi harkita esimerkiksi, kun ääniympäristöasetuksen soveltaminen ei ole tarkoituksenmukaista rakennuksen erityisten ominaisuuksien vuoksi. Aina on kuitenkin noudatettava maankäyttö- ja rakennuslain esittämää olennaista vaatimusta, jonka mukaan rakennuksen ääniolosuhteet eivät saa vaarantaa esimerkiksi terveyttä, lepoa tai työntekoa (8). Poikkeamista haettaessa poikkeamisen tulee johtaa kokonaisuuden kannalta tarkoituksenmukaisempaan ja kokonaisuutena arvioiden järkevämpään lopputulokseen, kuin esimerkiksi yleisiä ohjeita ja määräyksiä tai asemakaavamääräyksiä noudattamalla. Asetuksen mukaan suunnittelijan on tunnettava tuotteiden ilma- ja äänitekniset ominaisuudet sekä tiedettävä, miten ne pystytään osoittamaan. Kelpoisuus voidaan esittää esimerkiksi simuloiden tai valmistajan ilmoittamien tuotedokumenttien avulla. Asetus määrittää myös erityissuunnittelijan kelpoisuusvaatimukset ja vaatimusluokat ja ottaa kantaa mm. erityissuunnittelijan kelpoisuuden arviointiin. (3, s. 2.)

## **2.7 Ohjeet ja tulkinnat**

Rakennusvalvontaviranomaiset käyttävät asetusten tulkinnan tukena esimerkiksi TOPTEN-kortteja ja erilaisia tulkintaohjeita, kuten Talotekninen teollisuus ja kauppa ry:n piirissä toimivan sisäympäristöryhmän laatiman oppaan selvennyksiä ja ohjeita. Joissakin kunnissa ja kaupungeissa on erikseen rakennusvalvontaviranomainen, joka leimaa erityissuunnitelman sen esittämisen yhteydessä. Eri kunnissa on kirjava käytäntö asetusten ja ohjeiden tulkinnoissa ja eri asioiden painotuksessa jopa saman kaupungin viranomaisten välillä. Asetusten tarkoituksenmukaisuuden ylitulkinta voi

johtaa helposti suunnittelun ylityöihin. Suunnitelmien ylityö voi aiheuttaa tarpeettomia investointi- ja elinkaarikustannuksia sekä suurempia ympäristöpäästöjä, kuin suunnittelijan määrittämä kulloiseenkin kohteeseen tarpeelliseksi katsoma ratkaisu. (8.)

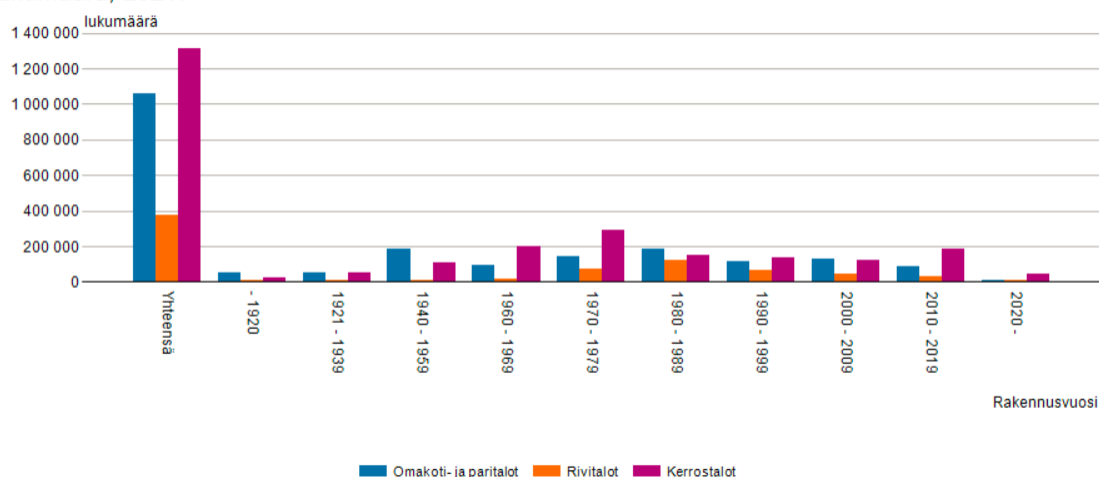
### 3 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT

Ilmanvaihtojärjestelmiä ja toteutustapoja on useita, ja ne ovat muuttuneet vuosien saatossa muun kehityksen mukana paljon. Vielä 1950-luvulle saakka yleisin ilmanvaihtojärjestelmä oli kaikissa rakennustyypeissä lähes ainoana silloisena järjestelmänä painovoimainen ilmanvaihto. Kehityksen mukana on syntynyt uusia innovaatioita ja toteutusmalleja ilmanvaihdon ratkaisuihin. (3, s. 1.)

#### 3.1 Nykytilanne ja tilastoja

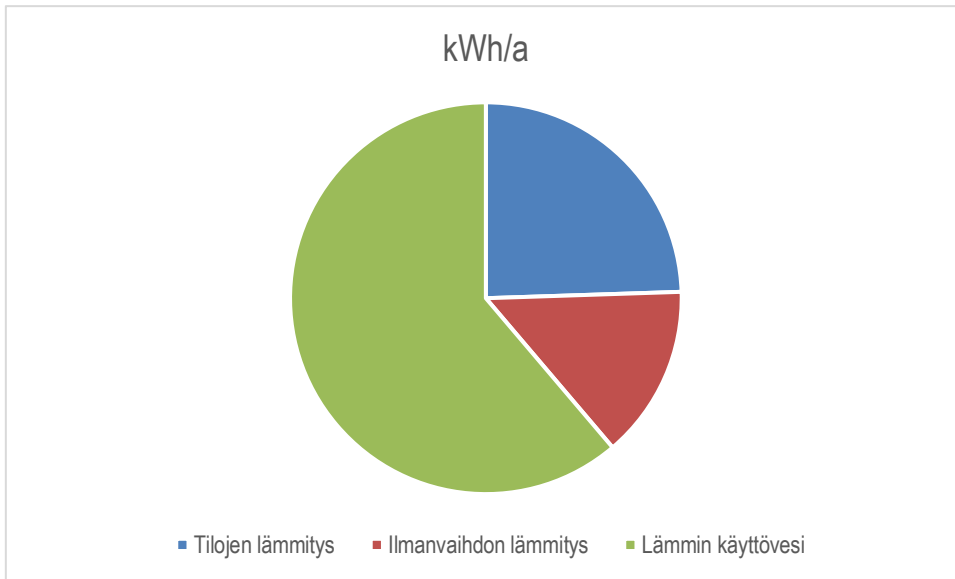
Suomessa asuntorakentaminen on yksi rakennustyyppien valtasegmenteistä. Asuntojen valtatyyppi on ollut pitkään kerrostaloasunto. Asuntojakaumat eri vuosina nähdään kuvasta 1.

Asunnot muuttujina Talotyyppi ja Rakennusvuosi. KOKO MAA, Vakinaisesti asuttu, Asuntojen lukumäärä, 2021.



KUVA 1. Asuntojakauma asuntotyypeittäin eri vuosina (8)

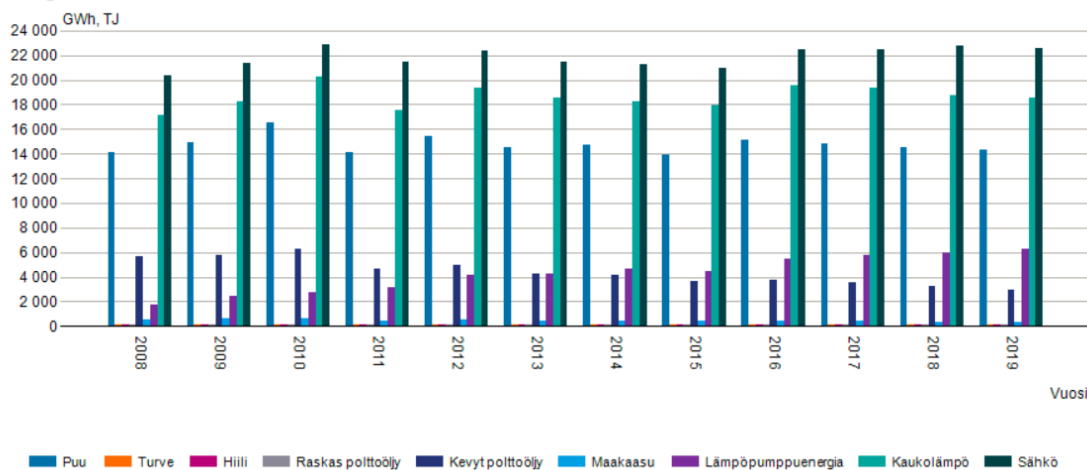
Ilmanvaihto on energiatehokkuuden näkökulmasta yksi suurimmista tekijöistä koko rakennuksen energiatalouden suhteen. Kuvasta 2 nähdään rakenteilla olevan viisikerroksisen kerrostalon tapauksessa energian nettotarpeiden jakauma todellisen energiatodistuksen perusteella. Kohteessa on asuntokohtaiset nykyaikaiset ilmanvaihtokoneet ja rakennuksen päälämmönlähde on maalämpö.



KUVA 2. Energian nettotarpeen jakauma esimerkkikerrostalossa

Lämmönlähteen vaikutus on olennainen osa rakennuksen energiataloutta. Kuvan 3 mukaan nähdään, miten lämpöpumput ovat yleistyneet viime vuosina, ja fossiilisten energiamuotojen osuus on hieman laskenut.

Asumisen energiankulutus muuttujina Energian lähde ja Vuosi. Yhteensä, Asumisen energiankulutus, GWh.



KUVA 3. Asumisen energiankulutuksen jakauma energialähteen mukaan (9)

### 3.2 Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto

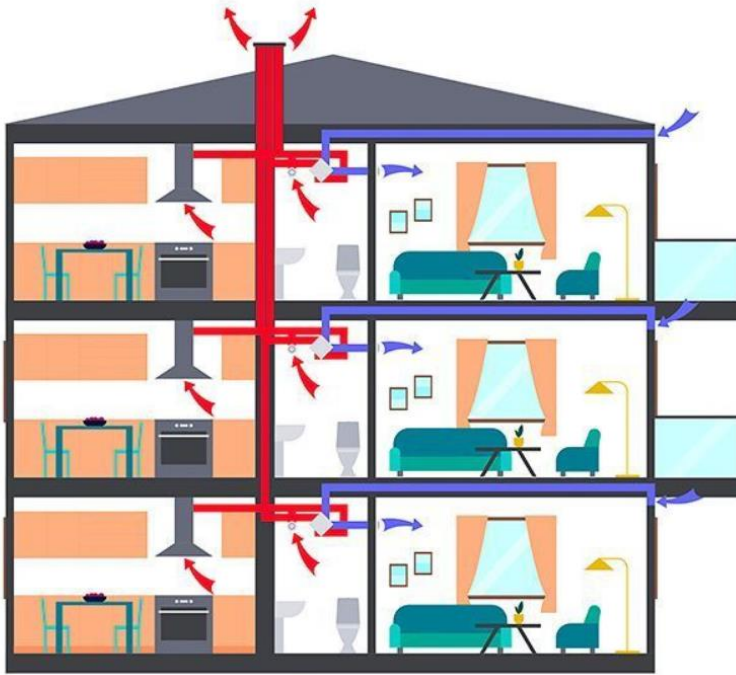
Asuntorakentamisessa valtaosa uudisrakennuksista toteutetaan koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Tuloilma johdetaan asuntokohteissa puhtaisiin oleskelutiloihin ja poistoilma poistetaan

asunnon likaisista tai kosteista tiloista. Tarvittaessa tulo- tai poistoventtiileitä lisätään, muihinkin tiloihin halutun ilmamäärätasapainon saavuttamiseksi. Koneellisen tulo- ja poistoilman suurin etu energiatehokkuuden kannalta on se, että poistoilman sisältämä lämpöenergia voidaan siirtää kylmemmän tuloilman esilämmittämiseen lämmöntalteenoton avulla. Itse järjestelmä voi olla keskitetty järjestelmä tai hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä, ja kumpaakin näistä käytetään nykyisin varsin paljon. (10.)

### **3.2.1 Hajautettu tulo- ja poistoilmanvaihto**

Huoneistokohtaisessa järjestelmässä asuntokohtainen ilmanvaihtokone sijaitsee tyypillisesti huoneistojen pesutilassa, kodinhoituhuoneessa tai erillisessä teknisessä tilassa tai varastossa. Pääperiaate järjestelmässä on se, että ilmanvaihtokone palvelee vain aina yhtä asuntoa. (10.)

Asuntokohtaisessa toteutuksessa ilmanvaihdon määrää voi säätää tarpeenmukaiseksi joko liesikuvun yhteydessä olevalta ohjauspaneelilta tai erilliseltä ohjauspaneelilta. Asuntokohtaisessa järjestelmässä ilmanvaihdon määrää voi tyypillisesti pienentää niin sanottuun poissaoloasentoon. Poissaoloasentoa tulee käyttää vain, kun asunnossa ei ole paikalla ketään eikä huoneistossa kuivateta esimerkiksi pyykkiä tai muutoin ilmanlaatu ei heikkene ulkoisista tekijöistä. Poissaoloasento tulee kytkeä pois käytöstä, kun asuntoon palataan. Tehostustoimintoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tilojen viilentämiseen yöaikaisella tuuletuksella tai kosteuden poistamiseen esimerkiksi suihkun käytön jälkeen. (10.) Ilmanvaihtoasetuksen mukaan asuinhuoneistojen ilmanvaihtojärjestelmää pitää pystyä tehostamaan 30 % suunnitellun käyttöajan ilmavirroista ja vastaavasti poissaoloasennolla voidaan pienentää enintään 60 % suunnitellun käyttöajan ilmavirroista (2). Hajautetun ilmanvaihdon periaate on esitetty kuvassa 4.

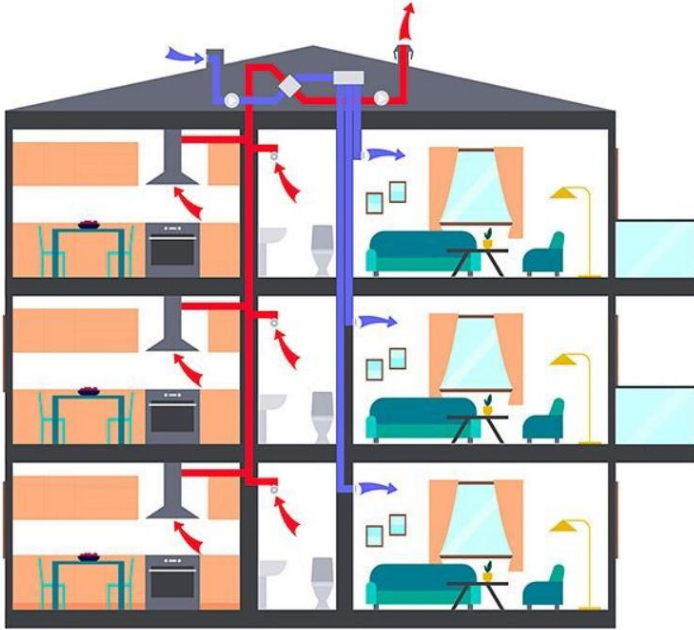


KUVA 4. Hajautetun ilmanvaihdon toimintaperiaate (10)

### 3.2.2 Keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihto

Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokonelaitteisto sijaitsee rakennuksen katolla tai ullakkotilassa erillisessä ilmanvaihtokonehuoneessa, ja ilmanvaihtokone palvelee kaikkia asuntoja yhteisesti (10). Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä etenkin vanhempien asuinrakennusten ilmanvaihdon ohjaus on toteutettu esimerkiksi viikkokello-ohjauksella, joten asukas ei voi vaikuttaa asunnon ilmanvaihtoon ja sen tehokkuuteen käyttöaikana. Nykytekniikka mahdollistaa uusiin ja saneerattaviin kohteisiin ilmanvaihdon säädön helpommin myös asukkaan toimesta, esimerkiksi IMS-peltien ja erillisten tehostuskytkimien avulla. (11.)

Keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän etuja on huoltokohteiden, kuten suodattimien, puhaltimien ja LTO-kennon keskittymä yhteen laitteeseen. Ilmanvaihtokone sijaitsee myös yleensä paikassa, mihin huoltomiehellä on vapaa kulku, eikä siksi huoltomiehen ole tarvetta mennä kenenkään asuntoon tavanomaisessa huoltotilanteessa. (11.) Eduksi voidaan katsoa myös se, että keskitetyn ilmanvaihdon haitallinen säätö, lämmitysvastusten säätäminen tai koko koneen sammuttaminen asukkaan toimesta, esimerkiksi sähkön markkinahinnan ollessa korkealla on käytännössä estetty. Keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.

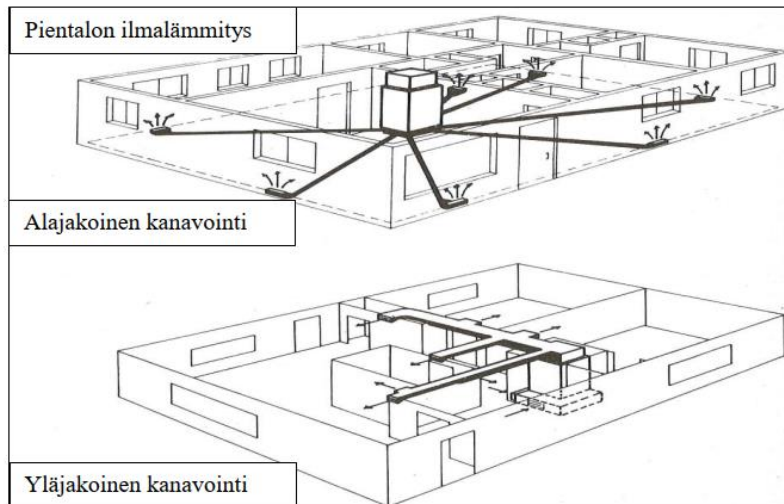


KUVA 5. Keskitetyn ilmanvaihdon toimintaperiaate (10)

### 3.3 Ilmalämmitys

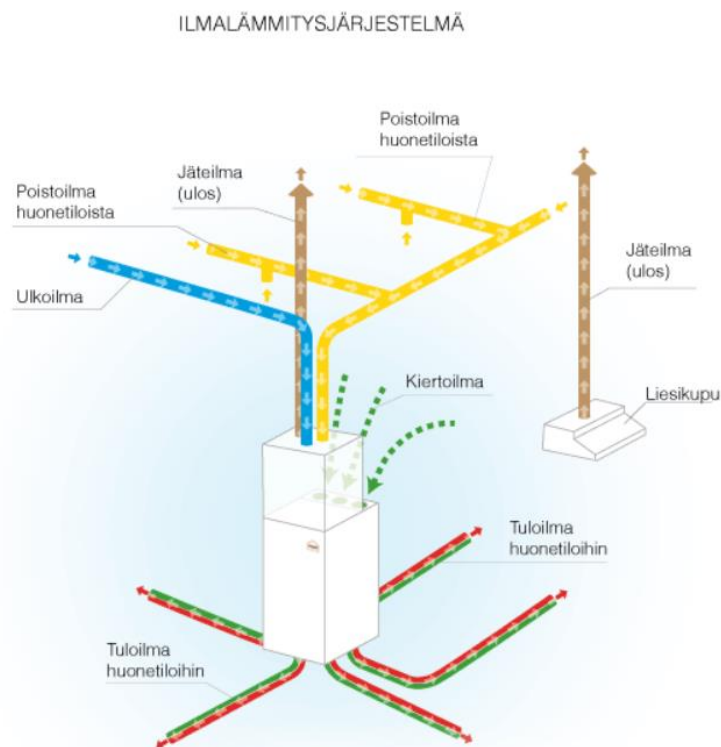
Ilmalämmitys oli 1970-luvulla aikansa edistyksellinen ja suosittu ilmanvaihtojärjestelmä, joka samalla toimi osana asunnon lämmitysjärjestelmää. Ensisijaisesti ilmalämmitys on kuitenkin ilmanvaihtojärjestelmä. Vuoteen 1981 mennessä Suomessa oli asennettu jo yli 10 000 asuntoon ilmalämmitysjärjestelmä. (12.)

Ilmalämmitysjärjestelmässä tuloilmaa lämmitetään esimerkiksi sähkökattilan, öljypolttimen tai muun ulkoisen lämmittimen avulla ja tuloilma puhalletaan ylälämpöisenä lattiassa olevien venttiilien kautta ulkoseinustalle ikkunan alta huoneilmaan. Vaihtoehtoisesti kanavisto voidaan toteuttaa yläjakoisena ja sijoittaa venttiilit kattoon, tämä kuitenkin vähemmän toteutettu malli järjestelmästä. (13.) Kanaviston yleisimmät toteutusvaihtoehdot on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Ilmalämmitysjärjestelmän kanavointivaihtoehdot (13)

Ilmalämmitystä ei voida käyttää kaikissa tiloissa. Kosteat tilat ja muut likaiset tilat, missä tuloilmaa ei erikseen ole, lämmitetään esimerkiksi erillisellä lattialämmityksellä. Ilmalämmityksen tehon parantamiseksi osa poistoilmasta kierrätetään takaisin tuloilman sekaan, jolloin saadaan suurempi ilmamäärä rakennukseen ja suurempi lämpöteho. (13.) Ilmalämmitysjärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Ilmalämmitysjärjestelmän toimintaperiaate (14)

Ilmalämmityslaitteita on vieläkin markkinoilla. Uusia laitteita käytetään lähinnä korvaamaan vanhat jo aiemmin asennetut laitteet. Toimintaperiaate uusissa laitteissa ei ole muuttunut, mutta lämmöntalteenottoteknologian kehittymisen myötä niiden energiatehokkuus on parantunut. Uusiin rakennuksiin ilmalämmitystä ei enää nykyisin juurikaan asenneta. (15.) Vuonna 2020 voimaan tulleen ”Ympäristöministeriön asetuksen eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista” -asetuksen mukaan jokaisessa huoneessa on oltava lämpöä itsesäätävä laite, ja se on asennettava siten, että se säätää lämpötilaa siinä tilassa, mihin se on tarkoitettu. Jos alueen tilojen sisäympäristöä koskevat vaatimukset vastaavat toisiaan, tai jos alueen huoneita ei ole rakenteellisesti erotettu toisistaan, itsesäätävät laitteet saadaan asentaa siten, että ne säätävät lämpötilaa rakennuksen osan määrättyllä lämmitetyllä tai jäähdytetyllä alueella. (15.) Käytännössä ilman soveltuvaa automaatiojärjestelmää säätöpelteineen ilmalämmityksellä eri huoneiden lämpötilan säätäminen on mahdotonta tämän asetuksen tarkoituksen mukaisesti.

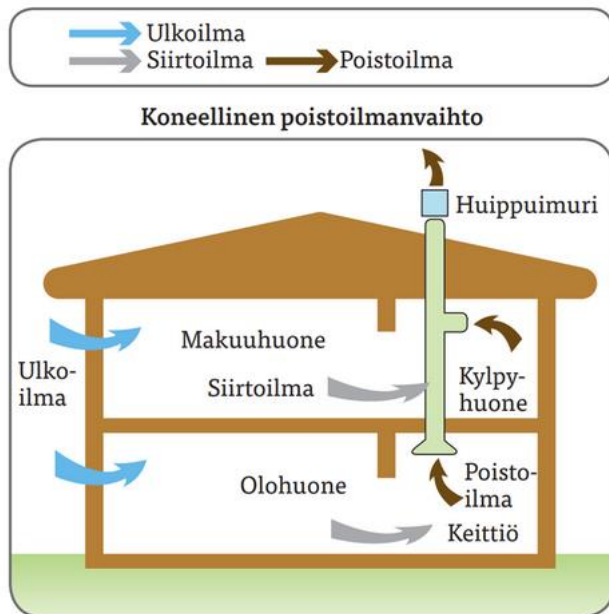
### **3.4 Koneellinen poistoilmanvaihto**

Koneellinen poistoilmanvaihto on järjestelmä, joka poistaa ilmaa koneellisesti ja tuloilma on toteutettu esimerkiksi korvausilmaventtiilein. Koneellinen poistoilmanvaihto voi olla toteutettu joko ilman lämmöntalteenottoa tai lämmöntalteenotolla varustettuna. Talteenotto vähentää järjestelmän elinkaaren energiakustannuksia. Koneellinen poistoilmanvaihto muodostaa helposti sisäilmaan suuren alipaineen, mikäli korvausilman toteutus on riittämätön.

#### **3.4.1 Koneellinen poistoilmanvaihto ilman LTO:a**

Painovoimainen ilmanvaihto oli vallitseva ilmanvaihtojärjestelmä uusissa asuinrakennuksissa 1960-luvulle saakka, jonka jälkeen selvästi yleistyi koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä. Järjestelmän periaate on se, että tiloista poistetaan kanaviston ja poistoilmaventtiilien kautta huoneilmaa koneellisesti avustettuna. Tällainen koneellinen puhallin voi olla esimerkiksi vesikatolle sijoitettu huippumuri, suoraan poistoilmaventtiin yhteyteen asennettu poistoilmapuhallin tai kanavistoon asennettu kanavapuhallin. Painovoimaiseen ilmanvaihtoon verrattuna järjestelmällä saadaan varmistettua olosuhteista riippumatta haluttu ilmanvaihto. Järjestelmä mahdollistaa yhteisten kokoojakanavien käytön koska ilman takaisinvirtaus ei ole käytännössä mahdollista, kun puhallin tuottaa riittävän paineen. Asuinkerrostaloissa on käytetty yleisesti yhteisiä kokoojakanavia, joihin asun-

tojen poistoventtiilit on liitetty. Ilman automatiikkaa asukkaan säätömahdollisuus ilmanvaihdon tehokkuuteen on käytännössä olematon. Yhteishuippuimuri voidaan säätää yhteisesti esimerkiksi tehostamalla pyörimisnopeutta kellonaikojen mukaan tai puhallin voi käydä tasaisella nopeudella koko ajan. (16.) Koneellisen poistoilman periaate on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Koneellinen poistoilmanvaihto periaatekuva (16)

Venttiiliin yhteyteen asennettavat puhaltimet ovat kohtuullisen kustannustehokkaita. Venttiilipuhaltimissa on puhallintehon säätämiseen sisäistä automatiikkaa varsin paljon, esimerkiksi sisäinen kosteusanturi, läsnäoloanturi ja lämpötila-anturi. Kosteusanturiohjattu venttiilipuhallin on helppo tapa varmistaa esimerkiksi kylpyhuoneen poistoilmanvaihto riittävänä siihen saakka, kun sisäilman kosteus laskee normaalille tasolle. Käyttäjän ei siis tarvitse itse muistaa tehostaa ja laskea ilmanvaihdon tehoa. Venttiilipuhallin voidaan kytkeä myös perinteiseen tyyliin, esimerkiksi kyseiseen tilan valokatkaisimen piiriin, jolloin ilmanvaihto kytkeytyy päälle, kun tilassa ollaan ja valot on kytketty päälle. Tällä ratkaisulla ei voida kuitenkaan varmistua, että puhallinteho on riittävä niin kauan, kun tilassa on merkittävästi sisäilman kosteutta.

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä on erityisesti kiinnitettävä huomioita riittävään ja hallittuun korvausilman toteutukseen. Koneellisesti avustettu poistoilma muodostaa sisäilmaan vastaavan korvausilmatarpeen ja suuren alipaineen, mikäli riittävästi korvausilmaa ei virtaa tilalle. Pahimmillaan korvausilmaa tulee rakennuksen ulkovaipan läpi rakenteista ja eristeiden läpi, kun hallittu korvausilman toteutus ei ole riittävä. Seinärakenteen läpi virtaava kylmä ilma voi aiheuttaa

kosteuden muodostumista rakenteisiin ja aiheuttaa ongelmia sisäilman laatuun ja aiheuttaa mikrobikasvustoa. Korvausilman riittämättömyys onkin yleisin ilmanvaihdon ongelma koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän rakennuksissa. (16.)

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ulkoilmalaitteiden kautta tulevan ulkoilmavirran kohtuullinen hallinta edellyttää vähintään 10 Pa:n paine-eron rakennuksen vaipan yli (17). Korvausilmaventtiilit voivat olla vastaavia kuin painovoimaisessa ilmanvaihdossa, mutta koneellisessa järjestelmässä venttiilillä voi olla suurempi paine-ero. Venttiilien kokoon ja sijaintiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, ettei korvausilma aiheuta ylimääräistä vedon tunnetta oleskeluvyöhykkeellä. Korvausilmaventtiili voi olla rakenteeltaan sellainen, että ilma lämpenee ennen huoneilmaan vapautumista. Tällaisia venttileitä on saatavilla esimerkiksi ikkunarakenteisiin valmiiksi asennettuna, mikä helpottaa kokonaisvaltaisempaa korjausrakentamista, esimerkiksi ikkunoiden uusimisen yhteydessä. Erään ikkunakorvausilmaventtiilin periaate on esitetty kuvassa 9.



*KUVA 9. Koneellisen poistoilman korvausilmaikkuna (18)*

Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä ei ole energiatehokas painovoimaisen ilmanvaihdon tavoin, ellei poistoilman lämpöenergiaa saada kierrätettyä. Vanhoihin rakennuksiin on viime aikoina lisätty runsaasti lämpöpumpputekniikkaa jäteilman lämpöenergian hyödyntämiseksi. (16.)



### 3.5 Painovoimainen ilmanvaihto

Painovoimainen ilmanvaihto perustuu pääasiassa korkeuseroihin, ulko- ja sisätilan lämpötilaeron sekä tuulen aiheuttamaan paine-eroon. Paine-eron vaikutuksesta ilma saadaan liikkumaan esimerkiksi hormin, kanavan tai korvausilmaventtiin kautta rakennuksen sisäilman ja ulkoilman välillä. Painovoimainen ilmanvaihto -nimitys tulee siitä, että kylmä ilma on lämmintä ilmaa painavampaa ja pyrkii siten alaspäin, kun taas lämmin ilma kevyenä pyrkii ylöspäin. (21, s. 43.)

#### 3.5.1 Haasteet

Asuntojen rakenteet, käyttöprofiili sekä rakentamista ohjaava lainsäädäntö on muuttunut vuosien saatossa niin paljon, että uusiin asuinrakennuksiin painovoimaisen ilmanvaihdon suunnittelu ei sovellu ilman koko rakennuksen suunnittelua yhtenä kokonaisuutena ilmanvaihdon kanssa. Suunnitteluvaiheessa ilmanvaihdon muuttaminen koneellisesta painovoimaiseksi on yleensä mahdotonta sellaisenaan, ilman suuria arkkitehtuurisia ja rakenteellisia muutoksia. 1900-luvun asunnoissa on ollut luonnostaan sellaisia ominaisuuksia, jotka ovat tukeneet painovoimaista ilmanvaihtoa, kuten poistoilmahormit ja niitä lämmittävät tulisijat. Uusissa rakennuksissa taas märkätilojen määrä ja pinta-alat sekä käyttöaste ovat kasvaneet merkittävästi. (3, s. 1–3.)

Painovoimaisen ilmanvaihdon huonot puolet ovat ilmanvaihtuvuus erityisesti lämpimänä kesäpäivänä, korvausilman vaatima energiankulutus ja vedon tunne. Pahimmillaan ilman liike voi olla hormissa päinvastainen, aiheuttaen ilman epäpuhtauksien ja hajujen siirtymistä asuntoon. Lämmittämättömän korvausilman lämmittäminen huoneilmassa esimerkiksi pelkällä lattialämmityksellä voi olla haastavaa, jopa osittain mahdotonta. Lämmitysjärjestelmään voidaan joutua lisäämään rinnakkaisia lämmityslaitteita, kuten vesiradiaattoreita tai sähköpattereita. Kaupunkiympäristö luo haasteita ilman puhtauden ja suodatuksen suhteen esimerkiksi liikenteen päästöjen ja katupölyn vuoksi. Kun ilmaa joudutaan suodattamaan mekaanisin suodattimin, huonontaa se ilmanvaihtuvuutta, koska suodattimissa on merkittävät painehäviöt. Painehäviöiden kasvaessa ilman siirtoreitillä ilmapurtojen hallinta on vaikeampaa, jopa mahdotonta. (3, s. 1–3.)

Nykyisillä teknisillä ratkaisuilla painovoimaisessa ilmanvaihdossa lämmöntalteenoton käyttö on käytännössä hyvin vaikeaa, mikä tekee järjestelmästä energiatehokkuuden kannalta ei vihreän -

ratkaisun. Energiatehokkuusasetuksen vaatimukset täyttääkseen painovoimaisen ilmanvaihdon rakennuksessa on rakennuksen oltava muuten energiatehokkuudeltaan hyvä (21, s. 264).

### **3.5.2 Toimivuuden todentaminen**

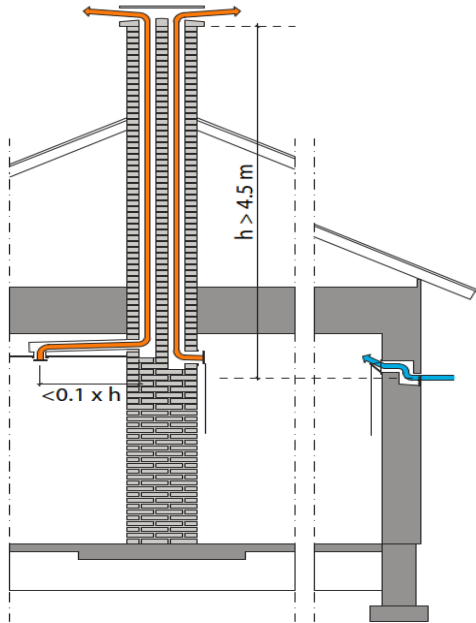
Painovoimaisen ilmanvaihdon toimivuuden osoittaminen pitemmällä aikavälillä tarkoin laskelmin on hankalaa, koska toimivuuteen vaikuttavat tekijät; tuuli ja lämpötila, muuttuvat sekä vuodenaikojen mukaan ja jopa vuorokauden sisällä merkittävästi. Haastavin tilanne on lämmin ja tyyni kesäpäivä, milloin paine-eroa ei luonnostaan synny, eikä myöskään ilma liiku halutulla tavalla ilmanvaihtojärjestelmässä. Toimivuutta voidaan tarkastella yleisellä tasolla esimerkiksi ympäristöministeriön laatiman painovoimainen ilmanvaihto opas -mukaan erilaisten yleistaulukoiden avulla. (3, s. 1–3.)

### **3.5.3 Arkkitehtisuunnittelu**

Järjestelmän suunnittelu edellyttää arkkitehdiltä painovoimaisen ilmanvaihdon tuntemusta, koska arkkitehtisuunnittelu on merkittävä osatekijä toimivan järjestelmän kokonaissuunnittelussa. Ilmanvaihtohormin tulisi sijaita lähellä harjaa siten että hormi olisi mahdollisimman korkea ja keskeisellä paikalla. Vanhan nyrkkisäännön mukaan hormi tulisi olla vähintään 4,5 m korkea. Hormissa tulisi välttää vaakasiirtoja, jotka lisäävät painehäviöitä ja huonontaa vetoa. Jokaiselle poistoilmaventtiilille tulisi olla oma hormi venttiililtä vesikatolle saakka. Painovoimaista ilmanvaihtoa suunniteltaessa suunnittelun lähtökohtana on kaksi eri vaihtoehtoa; huonekohtainen tulo- ja poisto sekä siirtoilmaratkaisu. Siirtoilmaratkaisussa korvausilmaa voidaan johtaa tilasta toiseen, mutta huonekohtaisessa järjestelmässä yhteen tilaan tulee sekä tulo- että poistoventtiilit, eikä ilmaa siirretä tilojen välillä. (3, s. 6.)

### **3.5.4 Poistoilmahormi**

Poistoilmahormin vetoon vaikuttaa korkeuden lisäksi sisäiset painehäviöt. Sisäisiä painehäviöitä aiheuttavat esimerkiksi hormin pituus, muoto ja monimutkaisuus sekä hormin pinnan karheus. Tiilihormia käytettäessä hormi täytyy slammata tasaiseksi sisäpuolelta. Vuoden 1978 D2 -ohjeen mukaan hormin vaakaputkiosuus saa olla 10 % koko hormin korkeudesta ja vakaaosuus asennetaan nousevaksi virtaussuunnassa. (3, s. 11.) Toimivan poistoilmahormin kriteerit ja periaate on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Poistoilmahormin toimivuuden reunaehdot (3, s. 11)

Poistoilmahormin ilmavirta voidaan laskea yksinkertaistetusti käytännön sovelluksissa kaavalla 1, kun hormi on puolen kiven tiilihormi tai 160 mm kierresaumakanava ja virtausnopeus hormissa ja venttiileissä enintään 0,6 m/s. Tämä vastaa ilmavirtaa, joka on kanavassa tai hormissa alle 12 l/s. Hormissa saa olla enintään kolme enintään 90° kulmaa ja hormin vaakasiirtymä enintään 10 % tuloilmasäleikön ja ulospuhallusaukon korkeuserosta. (21, s. 295.)

$$V = \frac{\sqrt{\Delta p_{HV} - \Delta p_U - \Delta p_S - \Delta p_P}}{\sqrt{3,6}} \times A \times 1000 \quad \text{KAAVA 1}$$

$V$  = hormivaikutuksen tuottama ilmavirta (l/s)

$\Delta p_{HV}$  = hormivaikutuksen tuottama paine-ero (Pa)

$\Delta p_U$  = tuloilmalaitteen painehäviö (Pa)

$\Delta p_S$  = siirtoilmalaitteen painehäviö (Pa)

$\Delta p_P$  = poistoilmalaitteen painehäviö (Pa)

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

Virtausreitien painehäviö saadaan yhtälöllä kaavasta 2, kun tiedetään ilmavirta (21, s. 295).

$$\Delta p_U + \Delta p_S + \Delta p_P = \Delta p_{HV} - 3,6 \times \frac{V^2}{A^2} \quad \text{KAAVA 2}$$

$\Delta p_P$  = poistoilmalaitteen painehäviö (Pa)

$\Delta p_S$  = siirtoilmalaitteen painehäviö (Pa)

$\Delta p_U$  = tuloilmalaitteen painehäviö (Pa)

$\Delta p_{HV}$  = hormivaikutuksen tuottama paine-ero (Pa)

V = hormin mitoitusilmavirta (l/s)

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

Hormivaikutuksen tuottama paine-ero saadaan yksinkertaisissa tapauksissa kaavasta 3 (3, s. 288).

Kaavaa voidaan käyttää, kun sisäilman lämpötila oletetaan olevan 21 °C.

$$\Delta p_{HV} = 0,04 \times h \times \Delta t$$

KAAVA 3

$\Delta p_{HV}$  = hormivaikutuksen tuottama paine-ero (Pa)

$\Delta t$  = lämpötilaero sisä- ja ulkolämpötilojen välillä (K)

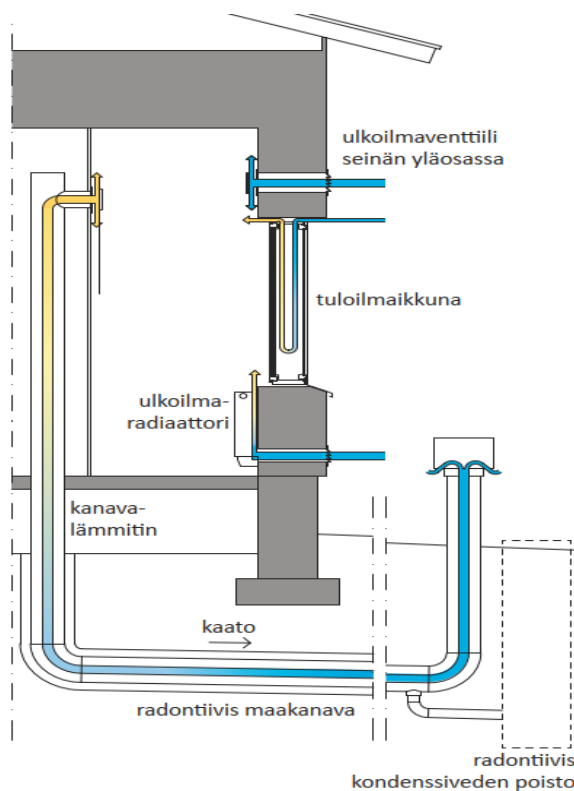
h = tuloilmaventtiilin ja hormin ulospuhallusaukon korkeusero (m)

### 3.5.5 Korvaus- ja siirtoilma

Korvausilman suunnittelussa tulee huomioida kylmän ilman aiheuttama veto ja asumismukavuustekijät. Venttiili pitää olla säädettävissä, jotta esimerkiksi kylmällä ilmalla vetoa voidaan rajoittaa helposti. Venttiili tulisi olla yksinkertainen, lyhyt painovoimaiseen ilmanvaihtoon soveltuva lautasventtiili, kippiventtiili tai muu alhaisen virtausvastuksen tuottava korvausilmalaite. Siirtoilmasäleikön tulee olla vastaavasti sellainen, ettei se aiheuta tarpeetonta painehäviötä ja laitteen aiheuttama painehäviö pitäisi olla alle 0,5 Pa. Yleisperiaatteena siirtosäleikön pinta-alasta voidaan pitää vaapaata virtausaukkoa, joka vastaa 50 cm<sup>2</sup> jokaista aukosta virtaavaa ilmalitraa kohden. Esimerkiksi 160 mm:n tavanomaisesta ilmanvaihtokanavasta ilman säleikköä voidaan tämän periaatteen mukaisesti johtaa ilmaa noin 4 l/s. (3, s. 8.)

Korvausilmaventtiilin sijaintia valittaessa on huomioitava, että sijainti on sellaisessa paikassa missä ulkoilma on puhdasta. Lähtökohtaisesti kaikki asuinhuoneet tulisi varustaa avattavalla ikkunalla tuuletuksen tehostamisen varmistamiseksi silloin, kun ulkoiset olosuhteet eivät ole riittävät tarpeellisen paine-eron muodostumiselle. Lisäksi jokaiseen tilaan tulisi asentaa korvausilmalaite tai reitti

siirtoilmalle. Korvausilmalaite olisi hyvä olla lämpötilan mukaan säätävä. (22, s. 257.) Mikäli korvausilmakanava asennetaan maahan, on huolehdittava, että kanavaan päässyt tai kondenssin vuoksi muodostunut kosteus poistuu hallitusti. Putkeen kertyessään kosteus voi aiheuttaa mikrobikasvustoa kanavan sisällä, mikäli se jää kanavaan pitkäksi ajaksi. Useimmat homesienet kasvavat lämpötilan ollessa +5...35 °C, optimilämpötilan ollessa +20...25 °C ja kosteuden ollessa pääasiassa yli 65 %. Erilaiset pölyt, kuten hiekkapöly ja siitepöly toimivat mikrobikasvuston ravinteina myös korvausilmakanavan sisällä. Korvausilmakanavassa virtaava ilmavirtaus kuitenkin rajoittaa mikrobikasvuston kasvun edellytyksiä. (22.) Korvausilmanventtiilin ja kanavan periaatteita on esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Korvausilman toteutustapoja (3, s. 10)

### 3.5.6 Painovoimaisen ilmanvaihdon tehostaminen

Avustettu painovoimainen ilmanvaihto on käytännössä painovoimainen ilmanvaihto, jonka tehostaminen on mahdollista koneellisesti tai muutoin ulkoisin tekijöin sellaisessa tilanteessa, jossa vetoa ei saada riittävästi aikaan painovoimaisesti. Suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon muiden hormien takaisinvirtausriski, kun käytetään esimerkiksi puhallinta poistoilmahormissa. (21, s. 218.)

Puhaltimella avustetussa painovoimaisessa ilmanvaihdossa poistoilmahormit varustetaan poistoilmapuhaltimella, joka ei aiheuta suurta painehäviötä pysäytettynä ollessaan ja siten rajoita ilma- vaihtoa silloin, kun puhallin ei ole päällä. Puhaltimeksi soveltuu esimerkiksi harvalapainen aksiaalipuhallin. Puhaltimen voi varustaa ohjausautomaatiolla, joka lisää puhallintehoa asetettujen ohjausarvojen mukaisesti esimerkiksi sisäisen kosteuden tai hiilidioksiditason noustessa tai ulkoilman lämpötilan nousun myötä. Järjestelmää tarkastellaan kuitenkin painovoimaisena ilmanvaihtona, mikäli ilmanvaihto perustuu pääosin lämpötilaeron ja tuulen vaikutukseen. Puhallinavusteisia painovoimaisia ilmanvaihtojärjestelmiä on rakennettu enemmän Ruotsissa, missä käyttökokemuksia on pidemmältä ajalta. Usein suunnitteluvaiheessa joudutaan muuttamaan painovoimainen ilmanvaihto koneellisesti avustetuksi, jos painovoimainen ilmanvaihto ei ole ollut lähtökohtana arkkitehtisuunnittelun alusta asti kaikessa suunnittelussa. (3, s. 4.)

Hormivaikutusta voidaan lisätä myös ulkoisella lämmittimellä, jolla hormia lämmitetään lämpötilaeron kasvattamiseksi. Ongelmatilanne on usein kesällä, joten luontainen toteutustapa on auringon avulla lämmittäminen, joko suoraan tai välillisesti aurinkopaneelin ja sähkön avulla. Ratkaisu ei ole kovin yleinen ja sitä onkin käytetty vain yksittäisissä kohteissa, mutta ratkaisussa on selkeästi nähtävissä potentiaalia tulevaisuudessa aurinkokeräinten yleistyessä, mikäli koneellinen avustaminen ei ole mahdollista tai sitä ei haluta käyttää (23). (3, s. 4.)

Painovoimaisessa ilmanvaihdossa voidaan käyttää hetkellisen tuuletuksen tehostamiseksi esimerkiksi ikkunatuuletusta. Ikkunatuuletus ei ole ratkaisu pitkäaikaiseen tarpeeseen, vaan sen tarkoitus on hoitaa tuuletus nopeasti ja tehokkaasti. Ikkunatuuletuksen ja muiden suurten aukkojen ilmamäärä saadaan kaavasta 4. (24, s. 211.)

$$q_v = \alpha \times A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \text{KAAVA 4}$$

$q_v$  = ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

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

$\Delta p$  = paine-ero (Pa)

$\alpha$  = aukon virtauskerroin, joka ilmaisee kurouman aukossa  $\alpha = A_k/A$ , missä  $A_k$  = kuroutuneen aukon pinta-ala

$\rho$  = ilman tiheys (1,2 kg/m<sup>3</sup>, kun ilman lämpötila on +20 °C ja paine on 1013 hPa)

Teräväreunisissa aukoissa  $\alpha = 0,61$ .

## 4 RAKENNUKSEN PAINESUHTEET

Rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon ja siten painesuhteeseen vaikuttaa useamman osatekijän summa. Alla keskeisimmät tekijät ja niiden vaikutusmekanismit painesuhteisiin.

### 4.1 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto on yksi tekijä, mikä vaikuttaa rakennuksen tai tilan paineeseen suhteessa ulkoilmaan. Yleisesti ohjeistetaan, että asuinrakennukset suunnitellaan lievästi alipaineiseksi. Painesuhteen ja alipaineen, sekä niiden määrä on vaihdellut eri oppaissa eri aikoina. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta -asetuksen käyttöönoton jälkeen asetuksen ohjeistuksessa oli maininta, että ilmanvaihto suunniteltaisiin tasapainoon, tästä ohjeesta on sittemmin luovuttu asuinrakennusten osalla. Uusimman ohjeen mukaan tilat, joissa on merkittäviä sisäisiä kosteuskuormia, suunnitellaan ulkoilmaan nähden lievästi alipaineisiksi 2–5 Pa, jotta kostea sisäilma ei pääse tunkeutumaan rakenteisiin. Tällaisia sisäisiä kosteuskuormia sisältäviä rakennuksia on esimerkiksi asuinhuoneistot, pesutuvat ja kuivaushuoneet. (17.)

Ikkunoiden huurtuminen tai jäätyminen voi johtua huoneiston ilmanvaihdon vääristä painesuhteista, jos huoneistossa on ylipainetta tai ilmanvaihto on riittämätön. Tosin ikkunoiden huurtuminen ei aina kuitenkaan johdu vain rakennuksen ylipaineisuudesta vaan siihen vaikuttaa myös muut tekijät. (25.)

Poistoilmakanavat likaantuvat tuloilmakanavia herkemmin, joten ajan kuluessa jäteilmavirta suhteessa ulkoilmavirtaan pienenee. Talvella poistoilmasuodatin likaantuu nopeammin suhteessa raikisilmasuodattimeen, kun ulkoilma on puhtaampaa hyönteisistä ja pölystä. Ilmanvaihto on aina alttiina säänvaihteluille ja ulkoiset olosuhteet voivat aiheuttaa hetkellistä häiriötä ilmanvaihdon toimintaan. Jäteilmalaite voi jäätyä sisäilman kosteuden kertyessä laitteen rakenteisiin ja tukkia ilman suunnitellun kulkureitin. Vastaavasti kosteusolosuhteiden tai lämpötilan muuttuessa nopeasti, voi ulkoilmasäleikköön kiinnittyä jäähilettä tai lunta, jolloin ulkoilmaa ei saada riittävästi virtaamaan säleikön läpi, ja rakennukseen muodostuu silloin suuri alipaine, kuten kuvasta 13 nähdään. Nämä tekijät voivat olla osasyitä rakennuksessa esiintyvään ylipaineisuuteen ja muutoinkin ilmanvaihdon huonoon toimintaan. (25.)



KUVA 13. Ulkoilmalaitteen tukkeutuminen ulkoisista tekijöistä

Ilmanvaihdon vaikutus rakennuksen painesuhteisiin on merkittävämpi, mitä tiiviimpi rakennus on. Huonon ilmatiiveysluvun rakennuksen alipaineisuuteen ei juurikaan vaikuta ilmanvaihdon ilmavirtasuhteet, kuten taulukosta 3 voidaan havaita.

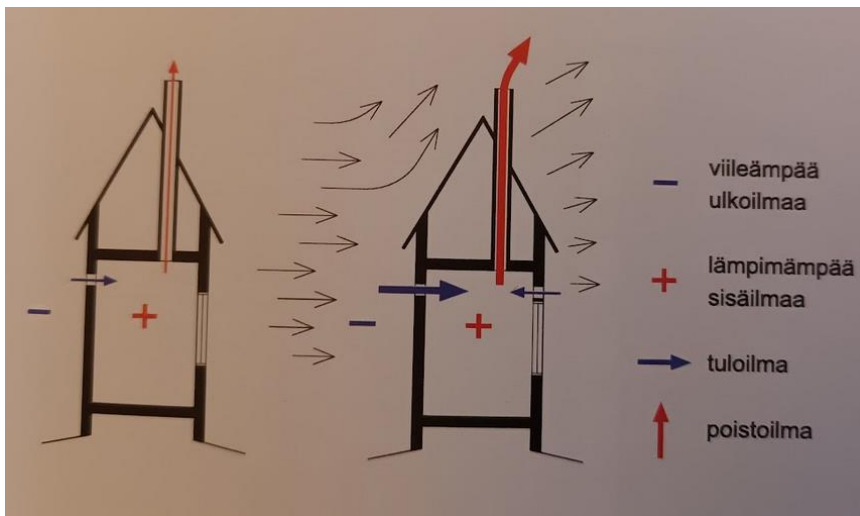
TAULUKKO 3. Ilmanvaihdon vaikutus ulko- ja sisäilman väliseen paine-eroon eri ilmanvuotoluviilla ja ilmanvaihdon ilmamääräsuhteilla (26)

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

#### 4.1 Tuulen vaikutus

Tuulen vaikutus on otettava huomioon arvioitaessa rakennuksen painesuhteita ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Etenkin painovoimaisen ilmanvaihdon tapauksissa on syytä tuntee tuulen nopeuden ja ulkoilman lämpötilan välinen yhteys. Yleisesti vuoden aikana kovimmat tuulet keskittyvät vuoden keskilämpötilaa vastaaviin päiviin, eikä kovilla pakkasilla tuulet ole kovin tavanomaisia. (24, s. 78.) Tuulen vaikutus ilmanvaihtoon on yleensä merkittävämpää lämpimänä vuodenaikana, kun lämpötilaerot ovat pienet ja ilmanvaihdon toimivuus on heikko painovoimaisessa ilmanvaihdossa.

Tuulen tehostava vaikutus perustuu hormin yläpäähän tuulen muodostamaan alipaineeseen ja toisaalta tuulenpuoleisella julkisivulla oleviin ulkoilmaventtiileihin kohdistuvaan ylipaineeseen. Harjakkatoisessa rakennuksessa tuulen suunnasta vastakkaiselle lappeelle muodostuu alipaine, mikä lisää hormin vetoa. Tasakattoinen katto on myös tuulen vaikutusta tarkastellen alipaineinen ja siten tuuli lisää vetoa hormissa, mikäli se on johdettu vesikatolle. Korkeassa rakennuksessa tuulen vaikutus on voimakkaampaa rakennuksen yläosassa, tämä siis tasaa tavanomaisen painovoimaisen ilmanvaihdon eroja ylä- ja alakerroksissa. Kovan tuulen vaikutus paine-eroon on suurempi, kuin sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista johtuva paine-ero. Uusissa rakennuksissa on kiinnitetty huomioita rakennustekniikassa rakennuksen vaipan tiiveyteen ja siten tuulen vaikutus on pienempi, mitä tiiviimpi rakennus on. Tuulen vaikutus kohdistuu lähinnä suunniteltujen korvausilma-aukkojen, ulkoilmasäleikön ja jäteilmalaitteen toimintaan. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa korvausilmaventtiileiden suunnittelussa tulee huomioida rakennuksen paikkakunnan vallitseva tuulensuunta, mikäli venttiileiden sijainteihin on mahdollista vaikuttaa. (3, s. 53–55.) Tuulen vaikutus rakennuksen vaippaan kohdistuvaan paineeseen on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. Tuulen vaikutus rakennuksen vaippaan kohdistuvaan paineeseen (3, s. 53)

Tuulen suuntaa ja nopeutta arvioitaessa on huomioitava tuulen havaintoaseman vertikaalinen tuuliprofiili. Sen määrittävät ominaisuudet ovat rajakerroksen paksuus  $\delta$  ja paikalliset tuuleen vaikuttavat esteet, kuten maastonmuodot, puusto ja rakennukset. Laskennassa näitä kuvaa eksponentti  $\alpha$ . Laskennassa käytettävät sääasemien tuuliprofiiliarvot ovat tavallisimmin  $\alpha$  0,14 ja  $\delta$  270 m. Paikallinen tuulenoisuus tietyllä korkeudella voidaan laskea lähialueen havaintoaseman tietojen perusteella kaavalla 5. (3, s. 289.)

$$U_H = U_{met} \times \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}}\right)^{\alpha_{met}} \times \left(\frac{H}{\delta}\right)^{\alpha}$$

KAAVA 5

$U_H$  = tuulen nopeus korkeudella H (m/s)

$U_{met}$  = tuulen nopeus sääasemalla (m/s)

$\delta_{met}$  = rajakerroksen paksuus sääasemalla (m)

$H_{met}$  = mittauskorkeus sääasemalla (m)

$\alpha_{met}$  = aerodynaamisen rosoisuuden arvo sääasemalla, dimensioton

H = paikallinen korkeus, jolla tuulennopeus halutaan määrittää (m)

$\delta$  = paikallinen rajakerroksen paksuus (m)

$\alpha$  = paikallinen aerodynaamisen rosoisuuden arvo, dimensioton

Maastovaikutuksen yleisimmät arvot nähdään taulukosta 2.

TAULUKKO 2. Maastokertoimet tuulennopeudelle (3, s. 289)

Ympäröivän maaston vaikutus		
Maaston kuvaus	$\alpha$	$\delta$
Suurkaupunkien keskustat, joissa yli 50 % rakennuksista on yli 25 metriä korkeita	0,33	460
Kaupunkimaiset ja metsäiset alueet, joilla on tiheässä omakotitalon korkuisia tai korkeampia esteitä	0,22	370
Avoin maasto, jossa on harvassa yli 9 metriä korkeita esteitä	0,14	270
Täysin avoimet alueet, merialueet ja suuret järvet	0,1	210

Tuulen julkisivuun aiheuttama paine on suhteessa tuulen nopeuteen ja suuntaan. Tuulen aiheuttamalla paineella tarkoitetaan tässä yhteydessä painetta julkisivupintaan kohdistuvan paikallisen paineen ja ulkoilman ilmanpaineen välillä. Tuuli voi aiheuttaa ylipainetta ja alipainetta, riippuen tuulen suunnasta ja rakennuksen julkisivun positioista suhteessa tuuleen. Tuulen aiheuttama paine voidaan laskea kaavalla 6. (3, s. 289.)

$$P_t = C_p \rho \left( \frac{U_H^2}{2} \right)$$

KAAVA 6

$P_t$  = tuulen paine julkisivulla (Pa)

$C_p$  = tuulenpainekerroin (-)

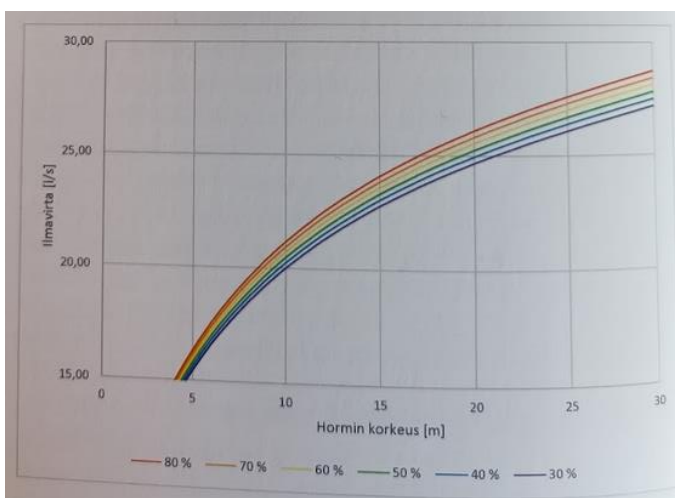
$\rho$  = ilman tiheys (1,2 kg/m<sup>3</sup>, kun ilman lämpötila on +20 °C ja paine on 1013 hPa, tai (1,29 kg/m<sup>3</sup>, kun ilman lämpötila on 0 °C ja paine on 1013 hPa)

$U_H$  = tuulen nopeus tarkasteltavalla korkeudella (m/s)

Kaavaa 6 voidaan soveltaa myös arvioimalla tuulen aiheuttamaa alipainetta poistoilmahormin yläpäässä tavanomaisissa hormiratkaisuissa, kun ilman virtaus on suurempi hormin suuaukkojen kohdalla, kun piipun ympärillä. Tällöin  $C_p$  arvona voidaan käyttää lukua -0,5 ja -0,2 väliltä. (3, s. 290.)

## 4.2 Terminen paine-ero

Terminen paine-ero tunnetaan puhekielessä myös nimellä hormivaikutus. Hormivaikutuksen saa aikaan lämpötilaerot esimerkiksi sisäilman ja ulkoilman välillä. Teoriassa myös ilman kosteuden muutos vaikuttaa hieman paine-eron suuruuteen ilman tiheyden muuttuessa. Kuiva ilma on tiheämpää, kuin kostea ilma ja siten sisäilman kosteus lisää hormivaikutuksen paine-eron suuruutta. Kosteuden vaikutus on käytännössä kuitenkin niin pieni, ettei vaikutusta yleensä huomioida tavanomaisten tapausten laskelmissa. Kosteuden lähes merkityksetön vaikutus perustapauksissa voidaan todeta kuvasta 15. (3, s. 45.)



KUVA 15. Sisäilman kosteuden vaikutus teoreettiseen enimmäisilmavirtaan uudessa puolen kiven hormissa, kun ulkolämpötila on 10 °C ja suhteellinen kosteus 60 % (3, s. 53)

Poistoilmahormin toimivuutta arvioitaessa tulee huomioida myös hormiin varastoitunut lämpöenergia ja sen vaikutus hormi-ilmiöön. Kylmä hormi jäädyttää lämmintä ilmaa samalla, kun ilma kulkee hormissa, joten paine-eron ja vedon suuruus pienenee. Vanhoissa rakennuksissa on usein hyödynnetty savuhormin lämpöenergia, sijoittamalla poistoilmahormi samaan piippuun savuhormin kanssa, jolloin lämmin savuhormi tehostaa ilman vaihtuvuutta. (3, s. 45.) Hormivaikutuksen suuruus voidaan laskea ulko- ja sisäilman tiheyden, etäisyyden neutraaliakselista ja maan vetovoiman kiihtyvyyden avulla seuraavasti kaavasta 7 (24, s. 112).

$$\Delta P = (\rho_u - \rho_s) \cdot h \cdot g \quad \text{KAAVA 7}$$

$\Delta P$ = paine-eron suuruus (Pa)

$\rho_u$  = ulkoilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

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

h = etäisyys neutraaliakselista (m)

g= maan vetovoiman kiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>)

Tämä paine-ero on painovoimaisen ilmanvaihtohormin käyttövoima lämpötilaerojen vaikutuksesta. Paine-ero voidaan laskea myös suoraan lämpötiloilla vain sisäilman tiheyden mukaan kaavasta 8, koska tiheys on kääntäen verrannollinen lämpötilaan (24, s. 112).

$$\Delta P = \rho_s \times g \times h \left( \frac{T_s - T_u}{T_u} \right) \quad \text{KAAVA 8}$$

$\Delta P$ = paine-eron suuruus (Pa)

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

h = etäisyys neutraaliakselista (m)

g= maan vetovoiman kiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>)

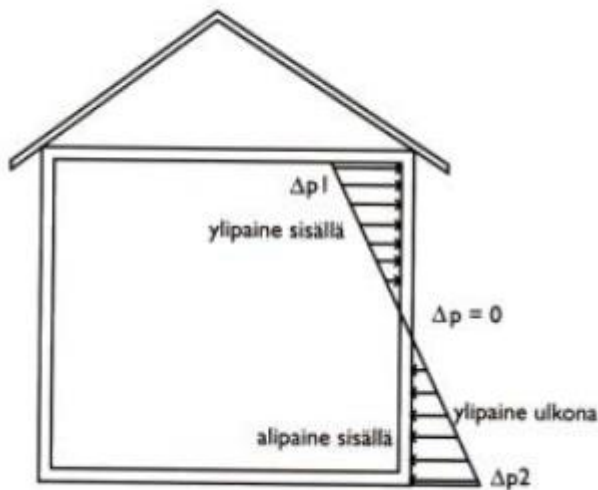
$T_s$ = sisäilman lämpötila (K)

$T_u$ = ulkoilman lämpötila (K)

#### 4.3 Painejakauma tilassa

Tasatiiviissä rakennuksessa rakennuksen yläosaan muodostuu ylipaine ja alaosassa vallitsee alipaine termisen paine-eron vaikutuksesta, koska lämmin ilma pyrkii nousemaan ylöspäin ja viileä

ilma pyrkii laskeutumaan alaspäin. Neutraaliakseli on kohta, missä paine on yhtä suuri tilan ulkopuolella ja neutraaliakselin korkeudella. Neutraaliakselin korkeusasemaa voidaan muuttaa esimerkiksi ilmanvaihdon tulo- ja poistoilman suhdetta muuttamalla. Kun suljettuun tilaan tehdään poistoilmahormi ja tilan yläosaan korvausilma-aukko, siirtyy neutraaliakseli ylöspäin ja tilaan muodostuu pääasiassa alipaine. Kun hormin korkeus tai koneellisen ilmanvaihdon alipaine on riittävän suuri, siirtyy neutraaliakseli niin ylös, että tila on kokonaan alipaineinen. Ilmanvaihdolla voidaan saada tilaan jopa haitallisen suuri alipaine, tällöin ilmanvaihto tulee tasapainottaa uudelleen. (3, s. 50.) Painejakauma ja neutraaliakselin korkeusaseman muodostuminen on esitetty kuvassa 16.



KUVA 16. Tasatiiviin rakennuksen lämpötilaeroista johtuva painejakauma (27)

Neutraaliakselin korkeusasemaa voidaan arvioida laskemalla. Laskennassa voidaan käyttää esimerkiksi kaavaa 9 (28).

$$H_{NPL} = \frac{H}{1 + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \times \frac{T_s}{T_u}}$$

KAAVA 9

$H_{NPL}$  = neutraaliakselin korkeusasema (m)

H = rakennuksen korkeus (m)

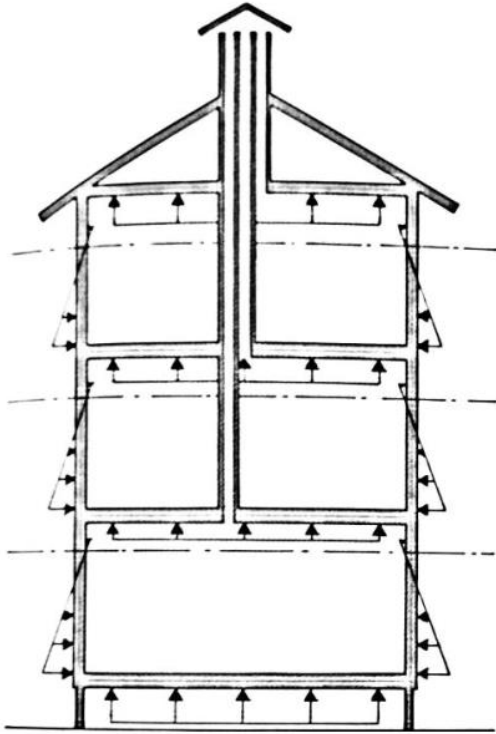
$A_1$  = vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen yläosassa (m<sup>2</sup>)

$A_2$  = vuotoaukkojen pinta-ala rakennuksen alaosassa (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = sisäilman lämpötila (K)

$T_u$  = ulkoilman lämpötila (K)

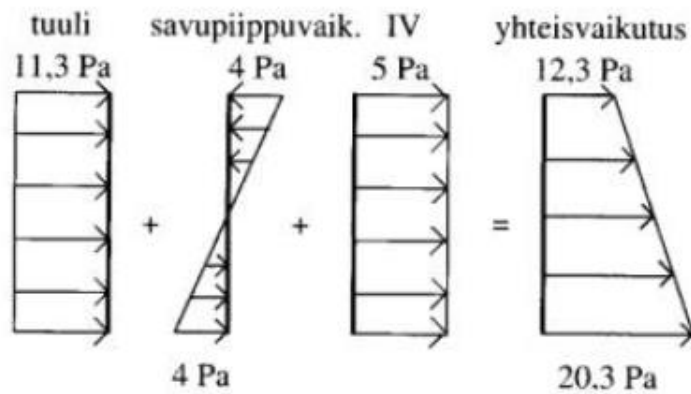
Kerrostalossa, jossa ilmanvaihto on toteutettu painovoimaisesti, muodostuu alimpiin kerroksiin suurempi alipaine mitä ylempiin kerroksiin, kuten kuvassa 17 on esitetty.



KUVA 17. Painejakauma kerrostalossa, jossa painovoimainen ilmanvaihto (29)

#### 4.4 Yhteisvaikutus

Rakennuksen paineisiin vaikuttaa käytännössä nämä kolme edellä käytyä asiaa: termisen paine-ero, tuuli ja ilmanvaihto. Nämä saavat aikaan yhteisvaikutuksen, joka on näiden kaikkien tekijöiden summa. Termisen paine-eron suuruuteen voidaan vaikuttaa rakennusvaiheessa rakennuksen geometriaa suunniteltaessa, mutta ulkoilman lämpötila on muuttuja mihin ei käyttäjä pysty vaikuttamaan. Ilmanvaihtoon voidaan vaikuttaa sopivan ilmanvaihtojärjestelmän valinnalla sekä ilmanvaihtoa säätämällä. (27.) Yhteisvaikutuksen muodostuminen on esitetty kuvassa 18.



KUVA 18. Paine-eron yhteisvaikutuksen muodostuminen tuulenpuoleiselle seinälle (27)

#### 4.5 Rakennuksen vaipan ilmatiiveys

Rakennuksen ulkovaipan ilmatiiveys täytyy huomioida jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja energiaselvitystä laatiessa. Mikäli rakennuksen ilmavuotolukuna käytetään energialaskennassa oletusarvoa  $4 \text{ m}^3/\text{h m}^2$  tiukempaa arvoa, tulee tiiveys todentaa mittaamalla. Ilmatiiveysluku siis vaikuttaa rakennuksen E-lukuun ja siten ohjaa rakentamaan mahdollisimman tiiviitä rakennuksia. (6.) Yleisesti ilmanvuotolukua 0,5 voidaan pitää erinomaisena tuloksena. Ilmatiiveysluku on todellisuudessa hyvin usein lähempänä lukua 1 kuin lukua 4. Vanhemmissakin vuosina 1979–2006 rakennetuissa omakotitaloissa keskimääräinen mittaustulos on välillä 2,5–2,9. (30.) Kuvasta 19 nähdään eräiden mitattujen uusien pientalojen tiiveyslukujakauma.



KUVA 19. Ilmanvuotoluvun jakauma pientalokohteissa (30)

Tiivis rakennus aiheuttaa haasteita painesuhteiden hallintaan enemmän, kuin epätiivis rakennus. Tiivis rakennus on energiatehokkaampi, koska ulkoilmaa ei kulkeudu hallitsemattomasti sisäilmaan, kun vastaavasti epätiivisssä talossa on paljon ilmavuotoja. Vuotoilmaan vaikuttaa sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero, pienellä paine-erolla vuotoilmavirta on myös pienempi. Vuotoilman lämmitykseen tarvittava energia saadaan kaavasta 10. (31.)

$$Q_{\text{vuotoilma}} = H_{\text{vuotoilma}} \times (T_s - T_u) \times \Delta t / 1000$$

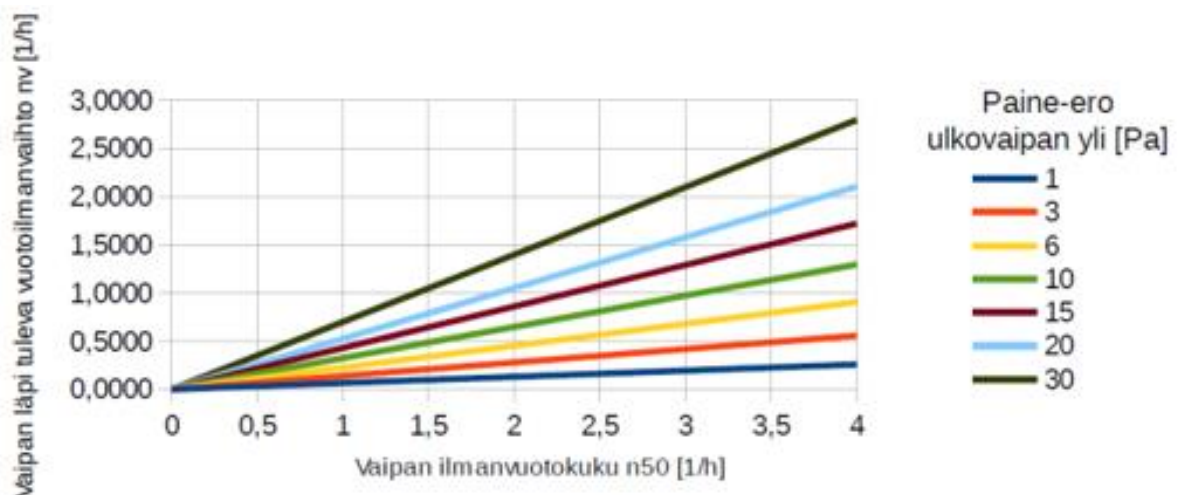
KAAVA 10

$Q_{\text{vuotoilma}}$  = vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia (kWh)

$H_{\text{vuotoilma}}$  = vuotoilman ominaislämpöahiö, (W/K)

$T_s$  = sisäilman lämpötila (°C)

Kuvasta 20 nähdään, miten vuotoilmanvaihdon määrä nousee suhteessa paine-eroon nopeasti.



KUVA 20. Paine-eron vaikutus vuotoilmamäärään (26)

Vuotoilmamäärää voidaan arvioida rakomaisesta aukosta kaavalla 11 (24, s. 261).

$$q_v = k L (\Delta p)^n$$

KAAVA 11

$q_v$  = vuotoilmamäärä (m<sup>3</sup>/s)

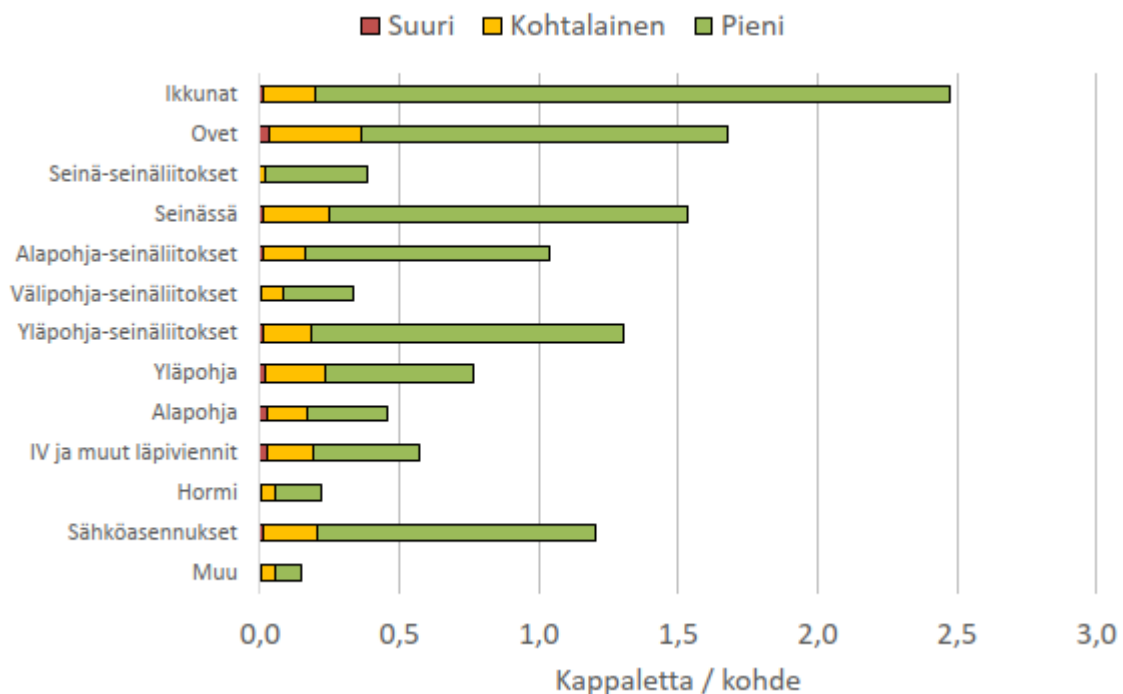
$k$  = raolle tyypillinen vakio (tiivistetyllä ikkunaraolla  $k = 0,005 \dots 0,2$ ) (l/s m)

$L$  = raon pituus (m)

$n$  = eksponentti, joka riippuu raon ominaisuuksista ja on hyvin pienille raoille 1 (laminaarinen virtaus) ja suurille  $n=0,5$ , keskimäärin 0,67

$\Delta p$  = paine-ero (Pa)

Yleisimmät ilman vuotopaikat asuinrakennuksissa ovat ikkunan tiivisteet, karmin tiivistykset sekä ilmavuoto ulkoseinässä. Suuret vuodot keskittyvät lähinnä huonosti tehtyihin ilmanvaihtojärjestelmiin ja sähköläpivienteihin sekä oven tiivisteisiin. Oven vuotoilma saadaan yleensä korjattua lähes kokonaan ovilehteä säätämällä ja tiivisteet korjaamalla. Tyypillisiä vuotopaikkoja ja niiden lukumääriä mita-  
tuissa pientaloissa on esitetty kuvassa 21. (30.)



KUVA 21. Tyypilliset pientalon vuotopaikkamäärät ja vuodon suuruus (30)

#### 4.6 Asuinrakennusten erityishuomiot

Asuinrakennuksissa on paljon tekniikkaa ja laitteita, joiden käyttö vaikuttaa rakennuksen painesuhteisiin. Nämä tulee erityissuunnittelijan ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa, mikäli ne vaikuttavat merkittävästi painesuhteisiin (2). Seuraavissa kappaleissa käsitellään asuinrakennuksiin liittyvät yleisimmät ja merkittävimmät tapaukset sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron hallinnan näkökulmasta.

#### 4.6.1 Liesituuletin

Yleisin erillispoistotapaus uudessa asuinrakennuksessa on liesipoisto, eli liesituuletin, joka on myös osa ilmanvaihtojärjestelmää. Liesituulettimen tyyppi voi olla ulospuhaltava tai huoneilmaan palauttava malli. Huoneilmaan palauttava -malli on varustettu säännöllisesti vaihdettavalla aktiivihiihiisuodattimella, joka suodattaa ilmasta epäpuhtauksia ja hajuja. Aktiivihiihiisuodatintuuletin on lisääntynyt suosiona nykypäivän asuntorakentamisessa. Ratkaisuun ohjaa taloudelliset ja toiminnalliset syyt; kanavointi, eristykset ja korvausilman toteutus jäävät pois tavanomaiseen ulospuhaltavaan malliin verraten. Kuvassa 22 nähdään nykyrakentamisessa suosittu tasotuuletinmalli, joita käytetään pääasiassa aktiivihiihiisuodatinkäytössä, tässä kohteessa ilma johdetaan ulkoilmaan.



*KUVA 22. Alaspäin imevä tasomallinen liesituuletin*

Lainsäädännössä ei ole suoraa määräystä liesituulettimen ja keittiön ilmavirroista, mutta yleisesti suunnittelun tukena käytetään Finvac ry:n laatimaa opasta ilmavirtojen mitoituksesta. Tähän oppaaseen perustuu myös useimpien kaupunkien LVI-tarkastajien valvonta ja tulkinat lainsäädännöstä. (8.) Oppaan mukaan keittiön normaaliajan poistoilmavirta on 8 l/s ja tehostustilanteessa 25 l/s. Mikäli liesipoisto on huoneilmaan palauttava malli, saavutetaan tämä tehostustilanteen vaati-

mus käyttämällä suunnitteluarvona mitoitustilanteessa poistoilmavirtaa 20 l/s, joka on 30 %:n tehostustilanteessa ohjeen mukainen 25 l/s. (32.) Keittiön ilmavirran minimivaatimus on tehostustilanteessa 25 l/s, mutta käytännössä nykypäivän liesituulettimet ovat huomattavan paljon tehokkaampia ja vaativat siten huomattavasti suuremman korvausilmavirran. Esimerkiksi Savo C52 -liesituulettimen tuotetiedoissa ilmoitetaan tuulettimen ilmavirraksi 80–166 l/s. Kokemukset osoittavat, että 25 l/s ei riitä poistamaan ruoanlaitosta syntyvää hajua ja kosteutta riittävästi. Liesikanava yhdistettynä ilmanvaihtokoneeseen ei myöskään tuota hajujen tehokkaan poiston kannalta riittävää ilmavirtaa, mikäli kanavasta aiheutuu merkittävästi painehäviöitä, eikä koneen teho ole riittävä tällaiseen ratkaisuun. Erityissuunnittelijan on huomioitava liesituulettimelle korvausilman toteutus riittävästi, ettei rakennukseen aiheudu haitallista alipainetta. (2.)

#### **4.6.2 Tulisija**

Uusia rakennuksia suunniteltaessa kiinnitetään yhä enemmän huomioita varautumiseen myös lämmitysjärjestelmien osalta. Tulisijan rakentamisen yksi peruste usein onkin, että tulisija toimii varalämmönlähteenä poikkeustilanteessa, kun päälämmönlähde ei ole toimintakuntoinen esimerkiksi sähkökatkon vuoksi. Tulisija muodostaa käyttöaikana rakennukseen huomattavan alipaineen, siksi tulisijalle onkin huomioitava ja suunniteltava riittävä korvausilma. Korvausilman esittäminen suunnitelmissa on käytännössä LVI-suunnittelijan vastuulla. (2.)

Palamisilman tarve on huomattavan suuri, sillä 1 kg polttopuuta vaatii palamisilmaa noin 10 m<sup>3</sup>. Esimerkiksi tyypillinen 5 kg sylillinen vaatii palamisilmaa noin 50 m<sup>3</sup>, riippuen hieman polttotekniikasta. Kiertoilmatakat ja kamiinat vaativat palamisilmaa hieman vähemmän perinteisiin varaaviin tulisijoihin verrattuna. (33.) Kuvassa 23 on nykyisin myös uudisrakennuksissa paljon käytetty pönttöuuni.



*KUVA 23. Uudiskohteen paikallamuurattu pöytäuuni*

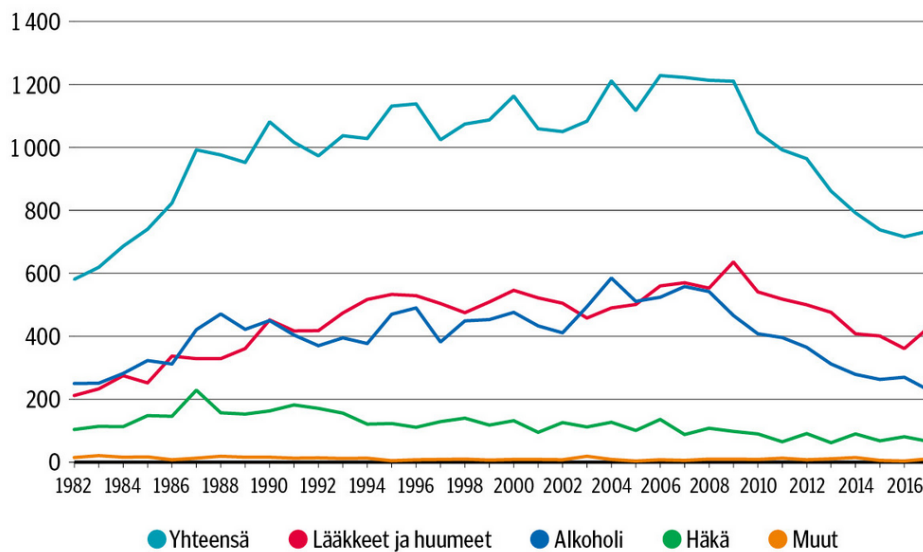
Perinteisen avotakan palamisilma aiheuttaa poistoilmavirtauksen, joka on suuruudeltaan jopa 500 m<sup>3</sup>/h, eli noin 140 l/s. Avotakassa palamisilman osuus tästä ilmamäärästä on vain noin 20 %, sillä suuluukuttomassa väljähormisessa takassa ilmaa on vaikea rajoittaa hallitusti. (3, s. 136.) Mikäli palamisilmaa ei ole suunniteltu ja huomioitu, on tulisijan veto huonoa ja palaminen epäpuhdasta. Ilmanvaihtokoneen takkatoiminto ei ole tarkoitettu palamisilman toteutukseen, vaan helpottamaan sytytysvaihetta. Takkakytin on usein ohjelmoitu ajastustoiminnolla, eikä takkatoiminto takaa riittävästi palamisilmaa ainoana ratkaisuna. (17.)

Tulisijan käytössä ja on huomioitava myös terveydelliset vaaratekijät, kun tulisija ei vedä kunnolla. Epäpuhdas palaminen muodostaa hieman ilmaa kevyempää, hajutonta, mautonta ja väritöntä hiilimonoksidia, eli häkää. Häkä voi aiheuttaa suurina pitoisuuksina jopa kuoleman, koska se syrjäyttää hapen verenkierrossa. Tulisijan savuhormissa on pitänyt jo vuosikymmeniä olla pieni häkäreikä, jonka kautta pääsee pieni ilmavirta liikkumaan. Häkäreiän vuoksi savuhormi ei siis ole täysin tiivis. (34.)

Tulisija on yleisin, joskaan ei ainoa häikämyrkytyksen aiheuttaja. Häikäkuolemien määrä on kuitenkin ollut viime vuosikymmenet laskeva. 20 vuotta sitten häikämyrkytys aiheutti jopa 132 kuolemaa vuodessa, nykyisin vastaava luku on noin 50. Kehitykseen on vaikuttanut paloturvallisuusasioiden tietoisuus ja toisaalta tulisijojen käyttöaste on pienentynyt. Voidaan siis todeta, ettei rakennuksen väärät painesuhteet ole viime vuosina lisänneet häikämyrkytystapausten määrää, vaikka rakennukset ovat entistä tiiviimpiä ja herkempiä painesuhteiden muutoksille. (34.) Huomioitava seikka on se, että häikämyrkytyskuolemantapauksista suuri osa, jopa yli 20 % on tahallisesti itse aiheutettuja. Valtaosa myös muista kuolemaan johtaneista häikämyrkytystapauksista liittyy asuntopaloihin, koska varsinainen kuolinsyy on häikämyrkytys. (35.) Palovaroitin on tullut suomessa pakolliseksi pelastustoimilain myötä vuonna 2000, tämän jälkeen kuolemantapausten trendi on ollut hieman laskeva. Häikävaroitimet ovat myös viime vuosina yleistyneet, mutta sen pakollisuutta ei säädetä laissa. Kuvassa 24 on esitetty häikämyrkytyskuolemien kehitys.

### Myrkytyskuolemien määrän kehitys

Suomessa vuosina 1982-2017.



KUVA 24. Myrkytyskuolemien määrät vuosina 1982–2017 (35)

### 4.6.3 Keskuspölynimuri

Yhä useammassa kodissa imuriksi valikoituu jo rakentamisvaiheessa keskuspölynimuri. Keskuspölynimuri imee huoneilmasta ilmaa imusuulakkeen kautta ja puhalttaa sen imurin läpi kiinteää ulospuhallusputkea pitkin suoraan ulkoilmaan. Keskuspölynimurin etuna on se, että laite ei aiheuta merkittävää ääntä käyttäjän lähetyvillä, koska itse imuriyksikkö sijaitsee usein esimerkiksi teknisessä tilassa. Laitteissa on myös varsin hyvä imuteho. Keskuspölynimuri aiheuttaa rakennukseen

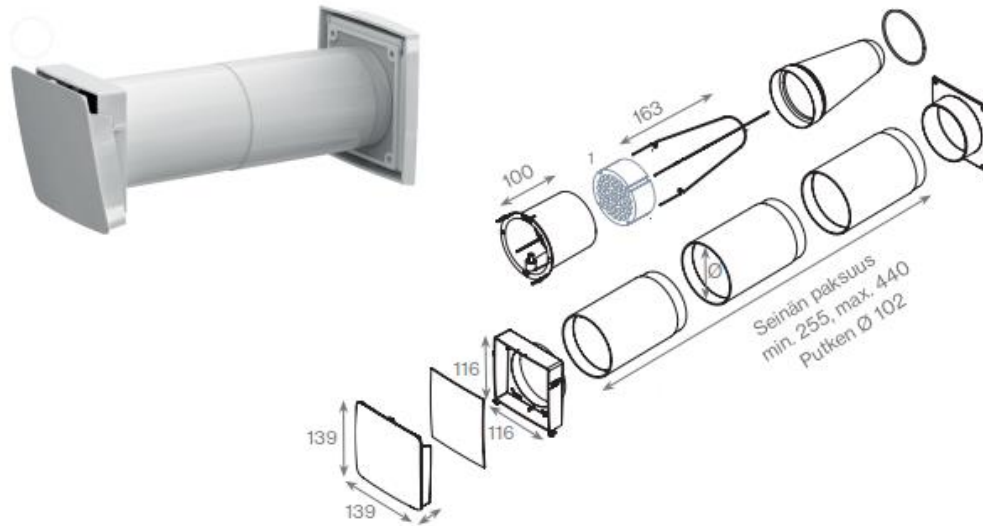
alipainetta käyttöaikana ja tämä on huomioitava myös korvausilmareittejä suunniteltaessa, käyttöaika voi isossa talossa olla pitkä ja usein toistuva. Flexit CVR 3000 -keskuspölynimurin mitattu ulospuhallusilma on esimerkiksi 54 l/s, joka on merkittävä ilmamäärä ilman riittävästi toteutettua korvausilmaa. Flexit-keskuspölynimureissa on vakiovarusteena kärkitietolähtö, esimerkiksi ilmanvaihtokoneelle tuloilman tehostamiskäskyä varten. (36.)

## **4.7 Suunnitteluratkaisut**

Nämä edellä mainitut tekijät aiheuttavat rakennuksen painesuhteisiin äkillisiä ja jopa haitallisia muutoksia, ellei niitä ole huomioitu suunnittelussa. Asuntomarkkinoiden kova kilpailu ohjaa rakentajia käyttämään taloudellisesti edullisia ratkaisuja, nämä ei kuitenkaan aina ole riittäviä, kun otetaan huomioon todelliset tekniset tarpeet. Erilaisia ratkaisuja valitessa ja toteuttaessa on huomioitava myös reklamaatiot ja niiden hoidon ja korjausten aiheuttamat kustannukset. Tavanomaisten kohteiden suunnittelussa on hyvin vakiintunut tyyli eri tapausten korvausilman toteutuksiin ja niistä alla on yleisimmät tavanomaiset tapaukset ja ratkaisut.

### **4.7.1 Painovoimainen korvausilma**

Perinteinen korvausilmaventtiili on yksinkertaisimmillaan seinän lävistävä putki, jonka päissä on päätelaitteet ja venttiili avautuu huoneilmaan. Venttiilimalleja on sekä suljettavia, vakioasentoisia ja lämpötilan mukaan säätyviä. Jos korvausilmaventtiili on tarkoitettu hetkelliseen käyttöön, tulisi se olla suljettava. Korvausilmaventtiili voi olla myös integroitu esimerkiksi ikkunarakenteeseen, tällöin venttiilistä käytetään nimitystä rakoventtiili. Korvausilmaventtiili on yksi yleisimmistä toteutuksista lähes kaikissa korvausilmatarpeen tapauksista esimerkiksi tulisijan ja liesipoiston korvausilman ratkaisuissa. Kun korvausilmaventtiilillä hoidetaan pitempiaikainen korvausilman tarve, venttiili olisi hyvä olla lämpötilan mukaan itse säätyvä. Korvausilmaventtiileitä on myös suodattimella ja äänenvaimentimilla varustettuna, niiden aiheuttama painehäviö tulee huomioida suunnittelussa. Kuvassa 25 on erään korvausilmaventtiilin periaate.



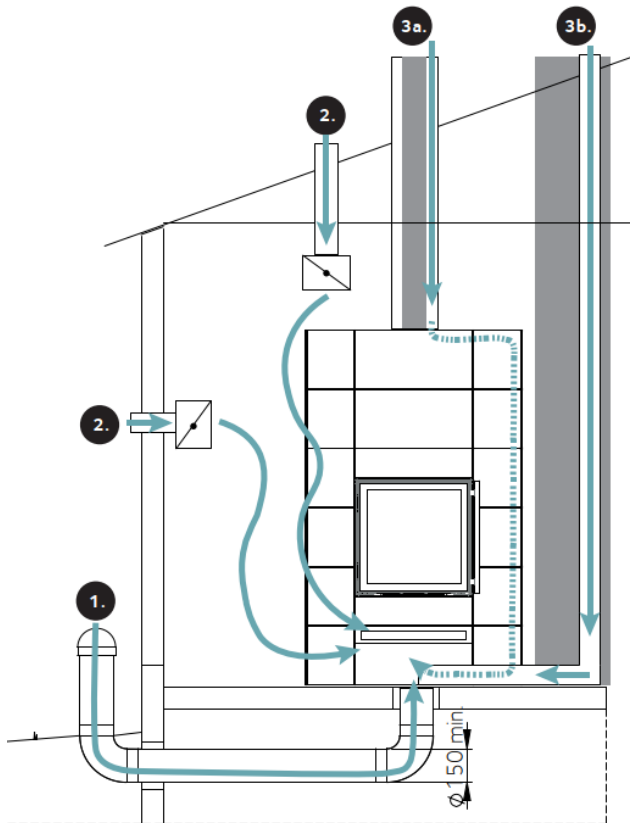
KUVA 25. Korvausilmaventtiili Vilpe Wiwe 100, äänenvaimentimella ja suodattimella (37)

Korvausilmaventtiili voi olla myös katossa, kun se on kanavoitu esimerkiksi yläpohjaan tai välipohjaan. Kanava tulee eristää silloin vastaavasti, kuin ulkoilmakanava ja lämpimässä tilassa kanavan kondenssieristykseen on kiinnitettävä erityistä huomioita. Tämä ratkaisu mahdollistaa käyttämään kanavassa esimerkiksi moottoroitua sulkupeltiä, jonka ohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi käsi-kytkimellä tai automaattisesti paine-kytkimellä, esimerkiksi liesipoiston korvausilman toteutuksessa. Ratkaisun etuna on muun muassa suuremman ilmamäärän siirtomahdollisuus kanavakokoa kasvattamalla, ja hallitsemattoman ilman liikkumisen estyminen, käytettäessä tiivistä peltiä. Moottoripeltiä käytettäessä on huomioitava pellin avautumisaika, koska moottorin ajoaika ääriasentoon voi kestää jopa 3 minuuttia. Moottoripeltiratkaisu on myös toimiva esimerkiksi tulisijan palamisilman toteutuksessa käsikytkinohjauksella. Pitkä ilman kulkureitti voi kuitenkin aiheuttaa vedon tunnetta, silloin kanavaan on syytä asentaa suodatin ja automaattisesti säätyvä vastus. Kuvassa 26 on erään valmistajan sulkupelti moottorilla.



KUVA 26. Tiivis sulkupelti moottorilla, Lindab DTBU (38)

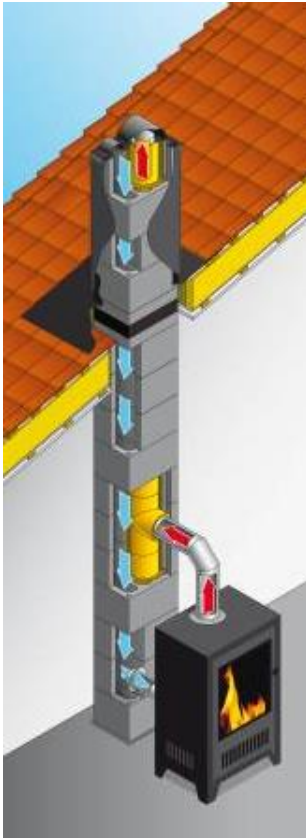
Tulisijan korvausilman toteutuksessa voidaan käyttää edellä mainittuja ratkaisuja tai toteuttaa palamisilma lattiarakenteeseen tai ryömintätilaan asennettavalla eristetyllä korvausilmaputkella, joka johdetaan suoraan tulisijan rakenteisiin. Erilaisia tulisijan palamisilman toteutusmalleja on esitetty kuvassa 27.



KUVA 27. Erilaisia korvausilmaratkaisuja (33)

Mikäli korvausilmaputki asennetaan lattiarakenteisiin, on huomioitava tulisijan valmistajan ohjeet. Tulisijavalmistajilla on yksilölliset asennusohjeet kullekin tulisijamallille, esimerkiksi korvausilmaputken koon, materiaalin ja sijoituksen osalta. Ilmakanavassa on oltava sulkumahdollisuus esimerkiksi tulisijan yhteydessä. Putken eristäminen on tehtävä huolellisesti, ettei sisätäyttörakenne jäädy ja lattian pintalämpötila laske haitallisesti. Lisäksi huomioitava putken sisään kertyvän kosteuden poisto, esimerkiksi asentamalla putki viettämään ulospäin.

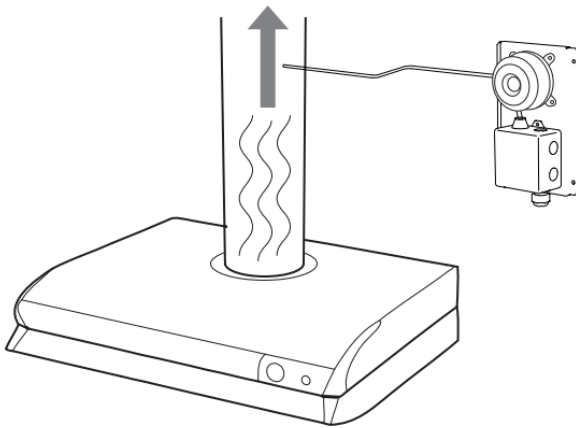
Markkinoille on tullut myös valmissavupiippuja, joissa on korvausilmareitti tulisijalle savuhormin rakenteessa. Korvausilmapiipun etuna on se, että erillisiä reikiä rakennuksen vaippaan ei tarvita, vaan piippu toimii sekä savuhormina, että ilmahormina. Tällainen korvausilmapiippu on esimerkiksi Schiedel Rondo Air, periaate on esitetty kuvassa 28. Korvausilmaa ei saa kuitenkaan johtaa piipun läpi avoimeen huoneilmaan, jonka läpi kulkeutuen tulisijaan. Ilman tulee kulkeutua suoraan tulisijaan avautumatta huoneilmaan, koska on vaarana, että korvausilmakanavan mukana tulee savun hajua ja epäpuhtauksia savupiipusta. Ulkoilmalaitteen sijoituksesta mainitaan ilmanvaihtoasetukseen perustuvassa sisäilmasto ja ilmanvaihto-oppaassa, että ulkoilmalaitte tulee olla 8 m etäisyydellä savupiipun aukosta.



KUVA 28. Korvausilmapiipun periaate (39)

#### 4.7.2 Koneellinen korvausilma

Korvausilma voidaan toteuttaa myös koneellisesti toteutettuna, esimerkiksi erillisen tuloilmakoneen avulla. Asuntorakentamisessa yleisin tapaus on lisätä asuntoilmanvaihtokoneen tuloilman määrää asuntoon, esimerkiksi liesituulettimen ollessa käytössä. Tämä vaatii hieman automatiikkaa ja sähkökytkentöjä. Kärkitieto ilmanvaihtokoneelle voidaan toteuttaa esimerkiksi paineakytkimellä, joka asennetaan liesipoistokanavan yhteyteen. Paineakytkimiä on eri laitevalmistajien lisävarusteina langallisena ja langattomina. Kanavaan asennettavan indikaattoriputken sijoituksessa tulee huomioida riittävä suojaetäisyys puhaltimesta ja virtaushäiriöitä aiheuttavista kanavaosista. (36.) Paineakytkimen asennuspaikan havainnekuva on esitetty kuvassa 29.



KUVA 29. Flexit-paineakytkimen asennusperiaate (36)

Tuloilman lisäämisen suurin ongelma tulo-poistokoneissa on koneen lämmöntalteenottolaitteen jäätyminen, mikäli tehostustoiminto kestää pitkäjaksoisesti pakkaskaudella. Toiminnon käyttäminen ainoana korvausilmaratkaisuna ei ole tämän vuoksi suositeltavaa, vaikkakin se on varsin yleistä. Ilmanvaihtokoneen takkakytkintoiminto perustuu tuloilman lisäämiseen, eikä se siten sovellu pitkäaikaiseen käyttöön. Painekytkintä käytetään myös sovelluksissa, kun halutaan aktivoida tehostustoiminto yleisilmanvaihdossa, esimerkiksi aktiivihillisuodattimin varustetun huoneilmaan palauttavan liesituulettimen käytön yhteydessä, asentamalla paineen indikointiputki liesituulettimen ilmanpalautuskanavaan. (8.)

Ongelmakohteissa tulisijan vedon parantamiseksi voidaan asentaa savuhormin päähän hormipuhallin. Puhallinta käytettäessä on huomioitava, että hormipuhallin ei ratkaise korvausilmaongelmaa,

vaan se lisää paine-eroa hormissa. Korvausilma voi siis tulla hallitsemattomasti rakenteiden läpi käytettäessä hormipuhallinta ilman riittävää korvausilman toteutusta.

Markkinoilla on myös laitteita, joissa on pieni puhallin ja lämmöntalteenottokeino ja suodatin, nämä ratkaisut soveltuvat hyvin saneerauskohteisiin esimerkiksi pienen tilan ilmanvaihtoon. Laitteita on pareittain toimivana, yhtä aikaa puhallussuuntaa vaihtavia tai yksittäisiä puhallussuuntaa vaihtavia laitteita. Laitteissa voi olla integroitu kosteusohjaus, tuuletustoiminto, langaton ohjaus WiFi:llä ja erilaisia ajastustoimintoja. (36.) Venttiili ei varsinaisesti sovellu suoraan korvausilman toteutukseen, koska tuloilmavirran ollessa jatkuvasti suurempi, kuin poistoilmavirta, jäätyy lämmöntalteenottoalaite jossain vaiheessa siirtyvän lämpöenergian ollessa epätasapainossa. Eräs LTO:lla varustettu huoneilmanvaihtolaite on esitetty kuvassa 29.



*KUVA 29. Huoneilmanvaihtolaite Flexit Roomie, lämmöntalteenotolla ja WiFi:llä (36)*

### **4.7.3 Vakiopainesäätö**

Ilmanvaihtokoneissa on ilmansuodattimet tavallisesti ulkoilmalle ja poistoilmalle. Suodattimet tukkeutuvat liasta ja pölystä ja suodattimen tuottama painehäviö kasvaa puhtaaseen suodattimeen verrattuna. Tukkeutuminen ei ole tasaista tulo- ja poistupuolella, sillä ulkoiset kuormitukset voivat muuttua etenkin ulkoilmassa. Ulkoilmassa olevan pölymäärään ja epäpuhtauteen vaikuttaa muuttuvasti esimerkiksi vuodenaika, vuorokaudenaika, liikennemäärät ja hyönteisten määrä. Taajama-alueella pölymäärä on huipussaan kevättalvella katupölyn muodostumisen vuoksi. Suodattimien epätasainen tukkeutuminen muuttaa ilmanvaihtojärjestelmän tulo- ja poistoilmavirtojen suhdetta,

jos puhaltimet käyvät koko suodatinvaihtojakson vakiopyörimisnopeudella. Suodattimen tukkeutuminen on nopeampaa hienommalla suodattimella, mutta sen erotusaste on parempi. (24, s. 263.)

Vakiopainesäätö on harvemmin asuntokohtaisen ilmanvaihdon tapauksissa käytetty säätötapa, mutta markkinoilla on ilmanvaihtokoneita, joissa vakiopainesäätö on mahdollinen lisävaruste myös pienissä ilmanvaihtokoneissa. Vakiopainesäädössä mitataan puhaltimen tuottamaa kanavapainetta ja verrataan sitä asetusarvoon. Puhaltimen pyörimisnopeus säätyy siten, että asetusarvo saavutetaan. Vakiopainesäätö perustuu puhaltimen pyörimisnopeuden säätöön. Säätötapa on energiankäytön kannalta ihanteellinen, koska tehontarve riippuu suoraviivaisesti pyörimisnopeuden kuu-tiosta ja säätötapaa voidaan käyttää kaikilla puhaltimilla. Pyörimisnopeuden säätö voidaan tehdä monella tavalla, mutta yleisin tapa on ollut useampipyörimisnopeuksisen oikosulkumoottorin portaallinen säätö, mutta nykyisin varsin laajasti valmistajilla on käytössä energiatehokkaat EC-moottorit, joiden ohjaus on toteutettu 0–10 V pienjänniteohjauksella. Vakiopainesäädöllä saadaan minimoitua esimerkiksi suodattimien tukkeutumisesta johtuva painesuhteen muutos rakennuksen ilmanvaihtoon, kun säätö tapahtuu jatkuvana säätönä huomioiden paineen muutokset ilmanvaihtojärjestelmässä. (24, s. 146.)

## **4.8 Paine-eromittaus**

Rakennuksen painesuhteen mittaukseen vaikuttaa monet ulkoiset tekijät, kuten ulkolämpötila, ilman kosteus, tuulen suunta ja nopeus sekä ilmanpaine. Asuinrakennuksen käyttöönoton ja ilma-virtamittauksien yhteydessä tulisi tarkastaa sisä- ja ulkoilman välinen painesuhde. Tiiviissä talossa päätelaitteiden mittaus- tai mittalaittevirhe vaikuttaa paljon painesuhteisiin, vaikka mittaus olisikin tehty asianmukaisesti. (40.)

### **4.8.1 Mittalaitteet**

Rakennuksen painesuhteiden määrittämisessä tulee huomioida mittalaitteen tarkkuus ja mitta-alue. Asuinrakennuksen painesuhteiden mittauksissa esiintyvät paine-erot ovat yleisesti pieniä, jopa alle 10 Pa. Tämä asettaa erityiset vaatimukset laitteen erottelukyvylle ja tarkkuudelle. Mittalaitteita on eri sovelluksiin erilaisilla periaatteella toimivia, kuten erilaiset nestemanometrit, sähköiset painean-turit ja mekaaniset manometrit. Käytännössä huoltomittauksissa on käytössä yleisesti sähköiset manometrit, sillä laite on yleensä kevyt ja helppo kantaa mukana, ja laadukas mittalaite on tarkka

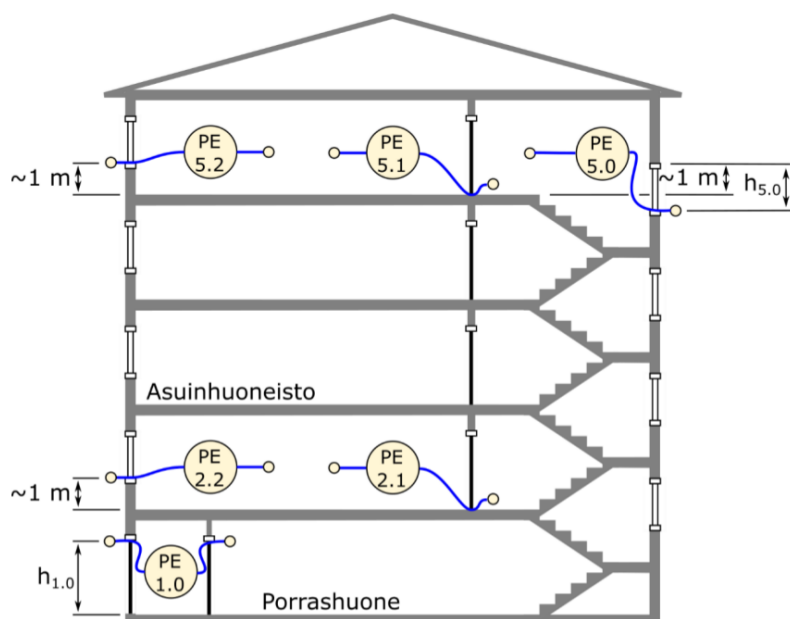
vaikkakin hankintahinnaltaan kallis. Sähköisillä laitteilla tulosten rekisteröinti ja lukeminen on yleensä helppoa ja nopeaa. (41, s 147–173.)

Mittalaitteiden mittausaluevaatimukset tavanomaisessa mittauksessa on minimissään -50...+50 Pa, ja mittarivirhe -10...+10 Pa alueella enintään 1 Pa. Mittalaitteen tulee kyetä mittamaan yli- ja alipainetta ja tunnistamaan pienet paine-erot. Jatkuvan mittauksen ja hetkellisen mittauksen laitteille on käytännössä samat vaatimukset. (40.)

#### **4.8.2 Mittaaminen**

Tavallisesti yhden asunnon rakennuksessa pyritään mittaamaan koko rakennuksen keskimääräinen paine-ero suhteessa ulkoilmaan. Mittaus suoritetaan noin metrin korkeudelta lattiatasosta. Mittaus on suositeltavaa toteuttaa samanaikaisesti kahdelta eri julkisivulta, koska tuuliolosuhteet voivat vaihdella rakennuksen eri sivuilla. Kaksikerroksissa rakennuksissa, paine-ero on suositeltavaa mitata sekä alimmasta, että ylimmästä kerroksesta ja kahdelta julkisivulta. Asuinkerrostaloissa ja korkeissa rakennuksissa on suositeltavaa mitata myös porrashuoneiden ja ulkoilman välinen paine-ero sekä porrashuoneen ja sisätilojen paine-ero vähintään hetkellisenä mittauksena. Korkeiksi rakennuksiksi lasketaan vähintään 15 m korkuiset rakennukset, esimerkiksi 5 kerroksiset asuin- ja toimistorakennukset. Seurantamittauksella saavutetaan luotettavampi mittaustulos, kuin hetkellisellä mittauksella, koska olosuhteet voivat muuttua mittausjakson aikana. Seurantamittauksella tarkoitetaan tallentavalla mittalaitteella tehtävää mittauksia, joka kestää mielellään 1–2 viikkoa ja mittauksen tulisi ulottua viikonlopun yli. (40.)

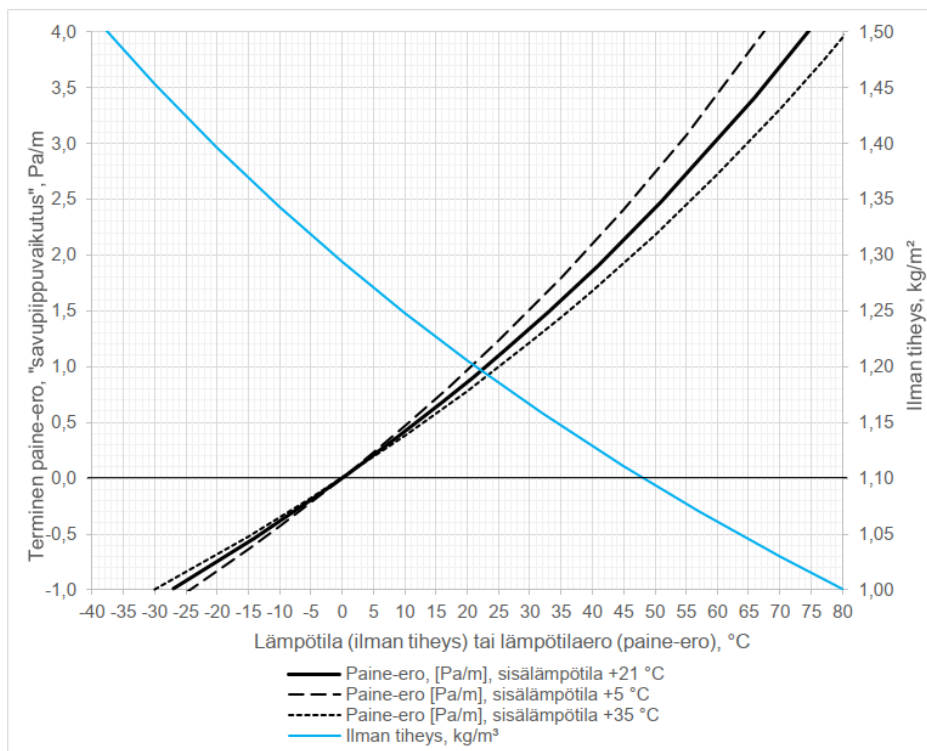
Yksittäisen tilan ja ulkoilman välisen paine-eron seurantamittauksessa paine-erologgeri asennetaan huoneeseen ja mittausletku johdetaan ulos kuten mitattaessa hetkellistä paine-eroa. Mittausletku on asennettava niin, ettei letkuun pääse kertymään sade- tai kondenssivettä. Letkun päässä voidaan käyttää väljää rasiaa tai tuulisuojava, jotta tuulen vaikutus mittaustuloksiin on pienempi. Markkinoilla on myös langattomia mittausjärjestelmiä, joista saadaan tietoa internetin yli jatkuvalla mittauksella. Tyypillinen mittauskohta rakennuksen vaipan läpi on ikkunan tai oven tiivisteiden väli, mistä kova painumaton letku johdetaan ulkoilmaan. Paine-eron mittausperiaatteet asuinkerrostalossa on esitetty kuvassa 30. (40.)



KUVA 30. Asuinkerrostalon sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittauspisteet ja mittausperiaate (40)

#### 4.8.3 Termisen paine-eron kompensointi

Mikäli mittaustilanteessa paine-eron mittausletkun korkeusasema poikkeaa 1 m:n tavoitearvosta yli 0,3 m, tulisi ottaa termisen paine-eron vaikutus huomioon ja korjata tulos vastaamaan 1 m korkeudelta mitattua arvoa. Mittauspisteen korkeusasema tulee merkitä mittauspöytäkirjaan, jotta termisen paine-eron vaikutus voidaan tarvittaessa huomioida. Yleisesti korjausta ei tarvitse tehdä, kun lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on alle 10 °C ja mittaus suoritetaan huonetilassa alle 2 m korkeudelta lattiasta. Korjaus tulisi tehdä aina, kun mittauspisteen korkeus eroaa 1 m:n referenssitasosta yli metrin, kun sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on suurempi kuin 5 °C. Korjauslaskennassa määritellään vaikutus korkeusmetriä kohden (Pa/m). Kertamittauksissa voidaan korjaus tehdä ilman laskentaa kuvan 31 mukaisesti, kun tiedetään lämpötila ulkona ja sisällä. (40.)



KUVA 31. Termisen paine-eron vaikutuksen korjauskuvaaja (40)

Jatkuvassa mittauksessa olosuhteet vaihtuvat, eikä kuvaajaa voi käyttää sellaisenaan luotettavasti.

Termisen paine-eron korjaus voidaan laskea myös kaavasta 12. (40.)

$$\Delta p_{korjattu} = \Delta p_{mitattu} - \frac{\Delta p}{\Delta h} \times (h_1 - h_0) \quad \text{KAAVA 12}$$

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

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

$\frac{\Delta p}{\Delta h}$  = terminen paine-ero (Pa)

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

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

Mikäli halutaan tietää paine-ero tietyllä korkeudella, käytetään muuttujan  $h_0$  korkeusasemana arvoa halutulta korkeudelta.

#### 4.8.4 Paine-eron tavoitetasot

Sisä- ja ulkoilman väliselle paine-erolle ja raja-arvoille on annettu erilaisia lukuarvoja ja suosituksia. Taulukosta 4 nähdään erään ohjeen suositellut arvot eri käyttötarkoituksissa.

TAULUKKO 4. Eräiden rakennusten sisä- ja ulkoilma välisen paine-eron suosituksia (40)

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

Käytöstä poistuneen vuoden 2012 rakennusmääräyskokoelman osassa D2 oli maininta, että rakennuksen paine-ero ulkovaipan yli pitäisi olla hieman alipaineinen, mutta alipaine ei kuitenkaan saisi olla yli 30 Pa. Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysohjeessa mainitaan, että alipaine ei saa olla niin suuri, että radonpitoista tai mikrobeja sisältävää ilmaa voi virrata ryömintätiloista asuntoihin. Alipaine ei myöskään saa vaikeuttaa asunnon ulko-oven tai ikkunan avaamista. Lisäksi rakennukseen sisään tulevien ilmavirtojen on oltava poistettavaa ilmavirtaa hieman pienempiä, jotta rakennus ei olisi edes yläosastaan ylipaineinen. (25.)

## 5 PAINESUHTEIDEN MITTAUKSET

### 5.1 Mittalaitteet

Mittaukset suoritettiin paine-eron osalta Ouman Wireless -mittausjärjestelmällä. Järjestelmä koostuu keskusyksiköstä (kuva 32) ja mittausantureista, joita voidaan liittää samaan keskusyksikköön jopa sata kappaletta. Keskusyksikkö liitettiin muuntajan kautta verkkovirtaan ja asennettiin rakennuksen tekniseen tilaan.



KUVA 32. Ouman Wireless -mittausjärjestelmän keskusyksikkö (42)

Tähän työhön valittiin anturit, joissa on kosteuden ja lämpötilan lisäksi mittausalueelle soveltuva paine-eroanturi. Keskusyksikkö liitettiin kiinteistön internet-verkkoon ja dataa luettiin web-käyttöliittymän kautta, joka on esiasennettu keskusyksikköön valmiiksi. Laitteiston käyttöönotto oli ohjeita noudattamalla todella yksinkertaista, eikä ongelmia käyttöönotossa ollut. Mittausdataa oli helppo käsitellä eri testitilanteissa reaaliajassa verkon yli mobiililaitteella tai tietokoneella. Mittausdataa pystyi keräämään yhdellä otannalla 10 000 näytteen verran jokaista mittauspistettä kohti. Mittausväliä säädettiin aina tarpeen mukaan tiheämmäksi, kun haluttiin saada tietoa nopeista painesuhteiden muutoksista. Esimerkiksi 1 minuutin mittausväliä dataa pystyttiin keräämään jopa viikon ajan, jonka jälkeen tiedot piti kerätä talteen, koska laite tallentaa uusimman mittaustiedon vanhimman päälle. Mittausdata oli helppo tallentaa esimerkiksi mobiililaitteella excel-tiedostoon.

Paine-eroanturit asennettiin ruuvaamalla anturit kiinteästi seinään ja kytkemällä ne verkkovirtaan. Verkkovirtaan kytketty anturi toimi samalla reitittimenä vahvistaen sisäistä verkkoa. Anturin mittausalue on -125...125 Pa ja mittaustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa +/- 3% mittausarvosta. Lämpötilan mittaustarkkuus on +/- 0,3 °C ja kosteuden +/- 3% rH. Kosteuden ja lämpötilan mittaus ei ollut ensisijainen tavoite tai tarkoitus, mutta nämä kirjattiin myös, koska ne olivat helposti saatavilla muun mittausdatan ohella samanaikaisesti. Anturiin liitettiin indikointiletkut, joista toinen johdettiin ulkoilmaan ikkuna- tai ovitiivisteiden välistä kovalla PVC-letkulla. Mittausletkun päät asetettiin samalle korkeudelle ulkona ja sisällä. Mittausanturi esimerkikohteessa on esitetty kuvassa 33.



*KUVA 33. Mittausanturi asennettuna sisäseinään, mittausletkut tässä vaiheessa vielä kiinnittämättä*

## **5.2 Mitattava kohde**

Tutkimuskohde on Pohjois-Pohjanmaalla sijaitseva 1,5-kerroksinen omakotitalo, joka on valmistunut lokakuussa 2021 ja kohteessa on asuttu noin vuoden. Rakennus sijaitsee tuulisella paikalla peltomaisemassa, eikä ympäristössä ole merkittävää tuulen suojaa. Kohde valikoitui käytännön syistä pääasialliseksi tutkimuskohteeksi, koska opinnäytetyön tekijä asuu itse talossa. Talon kerrosala on 192 m<sup>2</sup> ja huoneistoala 168 m<sup>2</sup>. Yläkerta on yhteydessä alakertaan avoimen porraskuilun kautta, jota ei ole mahdollista sulkea esimerkiksi ovella. Alakerran huonekorkeus on 2800 mm ja yläkerran huonekorkeus 2600 mm. Asuinrakennuksessa ei ole saunaa lainkaan. Höyrynsulku on

toteutettu Ekovilla x5 -ilmansulkupaperilla ja runko on tavanomainen puurunko märkäpuhalletulla puhallusvillalla.

Kohteen ilmanvaihtokone on Flexit Nordic S4, joka on koneellinen tulo- poistoilmanvaihtokone pyörivällä lämmöntalteenotolla. Kohteen liesituuletin on ulospuhaltava tasomallin liesituuletin, jonka kanavointi on toteutettu seinän sisässä kanttikanavalla. Jäteilman puhallus on toteutettu julkisivusta seinäpuhalluksena samalta sivulta raitisilmanoton kanssa. Rakennuksessa on keskuspölynimuri ja pönttöuuni-tulisija. Korvausilma tulisijalle on toteutettu maahan asennetulla 110 mm:n viemäriputkella suoraan tulisijan rakenteisiin alakautta. Liesituulettimen korvausilma on pääasiassa toteutettu erillisellä yläpohjaan asennetulla 160 mm:n korvausilmakanavalla, jossa on tiivis moottoripelti. Peltiä on mahdollista ohjata käsikytkimellä, lisäksi liesituulettimeen asennettu painekytkin ohjaa peltiä automaattisesti. Ilmanvaihtokoneen tuloilman kompensointia kokeiltiin myös mittauksissa eri tilanteissa, mutta normaalisti se ei ole käytössä.

Rakennuksen ilmanvuotolukua ei ole mitattu erikseen, eikä se siten ole tiedossa. Talossa on tekninen tila, jonka ilmanvaihto on painovoimainen oveen sijoitettujen ilmanvaihtoventtiilien kautta. Mittausten alkuvaiheessa nämä venttiilit pidettiin tarkoituksella kiinni, jotta niiden vaikutus nähtäisiin mittausdatasta eri käyttötilanteissa.

Kohteessa mitattiin paine-eroa sisä- ja ulkoilman välillä jatkuvalla mittauksella kahdesta pisteestä koko mittausjakson ajan. Mittauspisteet sijaitsivat eri kerroksissa. Yläkerran kaikki ikkunalliset tilat olivat makuuhuoneita, joten mittaus suoritettiin yläkerran osalta yhdestä makuuhuoneesta, missä oli sekä tulo- että poistoilmaventtiilit ja oven alareunassa ilmarako. Alakerrassa mittauspiste oli olohuone-keittiö-tilassa, ja indikointiletku ulkoilmassa sijaitsee lasitetulla terassilla, joka ei ole ilmatiivis. Ulkoilman mittauspisteet näkyvät kuvassa 34, alakerran mittauspiste sijaitsee lasitetun terassin sisällä ja yläkerran mittauspiste samalla kohdalla, mutta yläkerran ulkoseinässä alttiina tuulelle.



*KUVA 34. Mittauspisteet ulkoilmassa julkisivussa*

Ulkoilmassa indikointiletkun päät asennettiin alaosastaan rei'itettyyn sähköjakorasiaan, joka toimi tuuli- ja sadesuojana. Koska mittausjakso oli pitkä ja kohteessa asuttiin samaan aikaan, ei mittausletkuja tuotu yläkerrassa esimerkiksi aulatilaan, joka olisi ollut keskeisempi paikka. Alakerrassa mittausanturi sijoitettiin keittiön kaapiston päälle ja mittausletku johdettiin kaapin vieressä alas huonekorkeuden keskivaiheille. Mittauspiste ja oven läpivienti alakerrassa näkyy kuvassa 35.



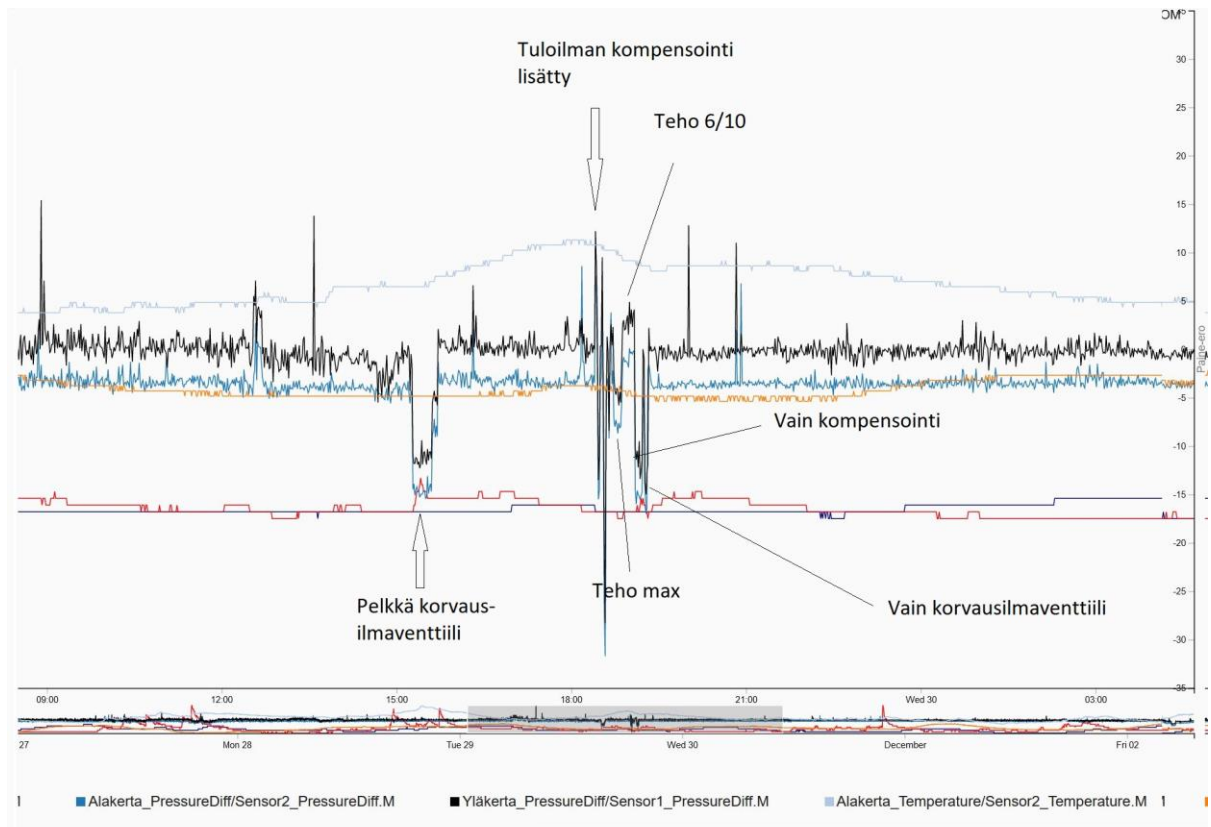
*KUVA 35. Alakerran mittauspiste ja indikointiletkun johtaminen ulkoilmaan*

### **5.3 Asuinpientalon mittaukset**

Mittausjaksolla simuloitiin tarkoituksella tilanteita eri ratkaisujen ääripäistä, jotta saatiin tietoa myös huonon toteutusratkaisun vaikutuksista painesuhteisiin. Mittausdataan sisällytettiin myös tavanomaista asumista kuvailevaa käyttöä olemassa olevin ratkaisuin. Mittauskuvaajat ovat pääasiassa kuvakaappauksia mittalaitteet web-käyttöliittymän kuvaajasta, jossa paine-eroa yläkerrassa kuvaa kaikissa kuvissa musta trendiviiva ja alakerrassa sininen trendiviiva. Mittausosiossa mainitulla paine-erolla tai alipaineisuudella tarkoitetaan sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa tai sisäilman alipainetta suhteessa ulkoilman paineeseen.

#### **5.3.1 Liesituuletin**

Liesituulettimen vaikutuksia tutkittiin kolmella eri tyylillä toteutettuna tai niiden yhdistelmillä. Tuloilman kompensoinnin puhallinasetuksena käytettiin puhallinprosentteina: tulo 50 % ja poisto 70 %, nämä tehot perustuivat optimaaliseen toimintaan keskuspolynimurin käyttötilanteessa. Liesituulettimen vaikutukset paine-eroon eri tilanteissa nähdään kuvasta 36.

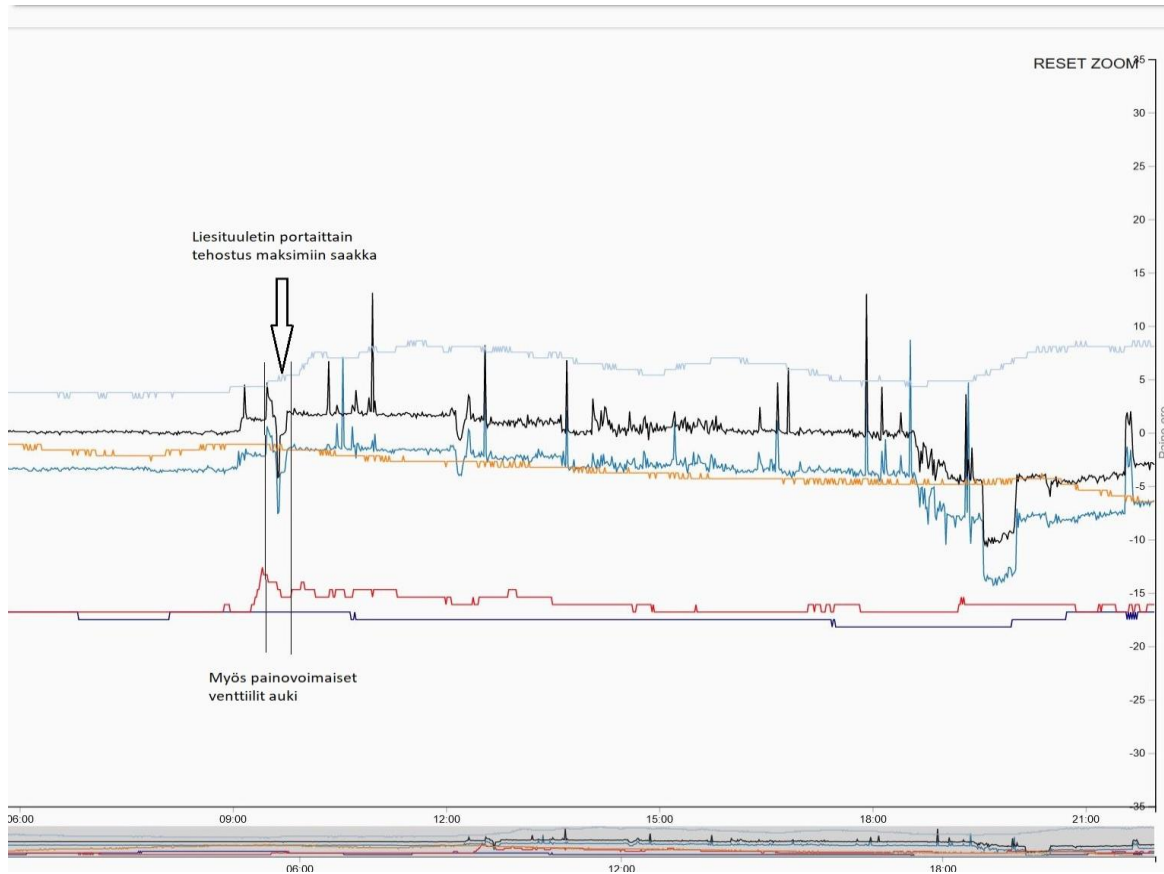


KUVA 36. Liesituulettimen käyttö ja sen vaikutus

Ensimmäisessä vaiheessa liesituulettimen korvausilma on johdettu ainoastaan korvausilmaventtiilin kautta, tästä aiheutuu noin 15 Pa:n paine-ero sisä- ja ulkoilman välille. Toisessa testivaiheessa tuloilman kompensointi IV-koneen kautta on otettu käyttöön korvausilmaventtiilin rinnalle. Alkuvaiheessa liesituulettimen ollessa täydellä teholla, muodostuu noin 10–15 Pa:n paine-ero, mutta kun teho lasketaan puoliteholle, on kompensointi niin voimakas, että se aiheuttaa yläkerrassa noin 5 Pa:n ylipaineen rakennuksen ulkovaipan yli, alakerrassa paine-ero on noin +/- 0 Pa. Liesituulettimen ollessa täydellä teholla, korvausilmana pelkkä tuloilman kompensointi ilman muita korvausilman toteutustyyplejä, muodostuu sisälle noin 15 Pa:n alipaine. Tuloilman kompensoinnin vaihto korvausilmaventtiiliin lisää alipaineisuutta etenkin yläkerrassa. Korvausilmakanavassa olevan moottoripellin hidas avautuminen ei käytännössä näy mittauksissa, kun mittaustiheys on 60 s.

Testissä mitattiin myös tilanne, kun kaksi painovoimaista ilmanvaihtoventtiiliä TKN-tilassa on noin 4 mm auki, lisäksi kompensointi oli käytössä ja korvausilmapelti auki. Tekninen tila on yhteydessä asunnon ilmatilaan alakattojen kautta. Kuvasta 37 nähdään, että alipaine on suurimmillaan noin 8

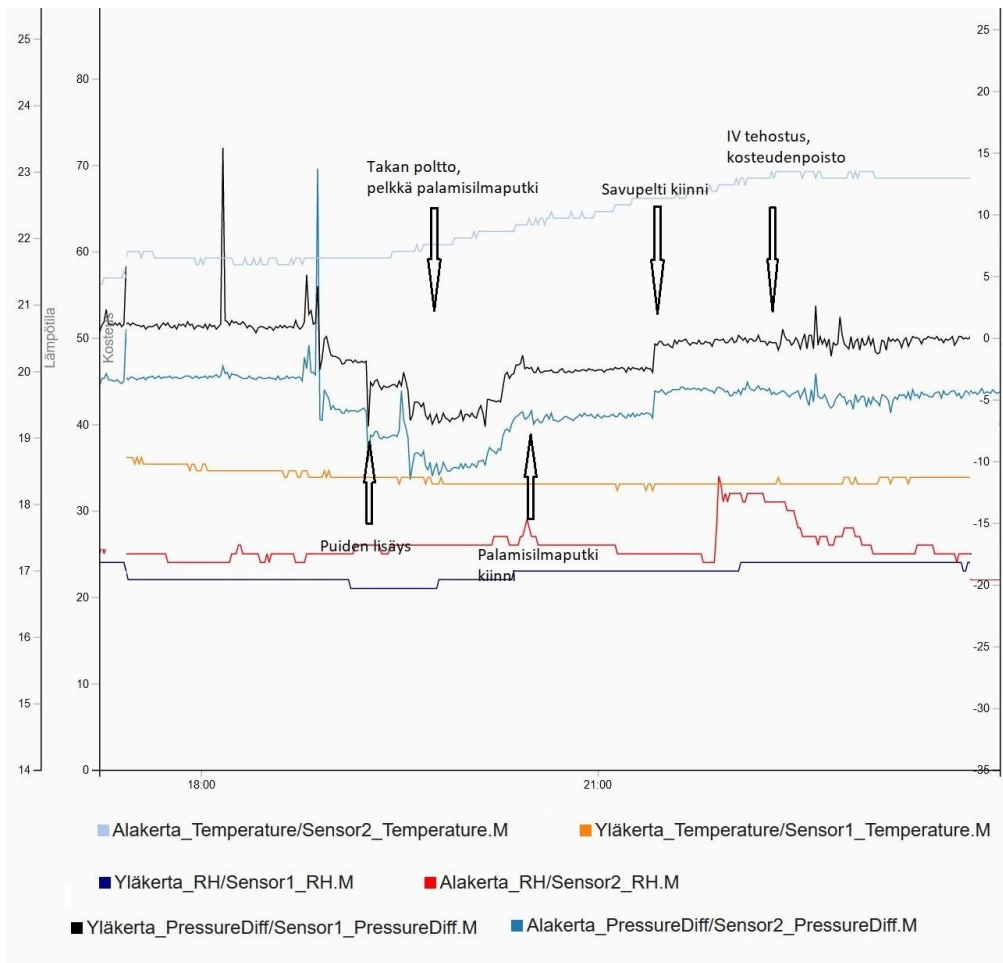
Pa:n luokkaa, vaikka liesituulettimen tehoa on nostettu portaittain aina täydelle teholle saakka. Alipaine ei siis eroa merkittävästi tilanteesta, kun venttiilit ovat olleet liesituulettimen käyttötilanteessa kiinni.



KUVA 37. Liesituulettimen käyttö, painovoimaiset venttiilit auki

### 5.3.2 Tulisija

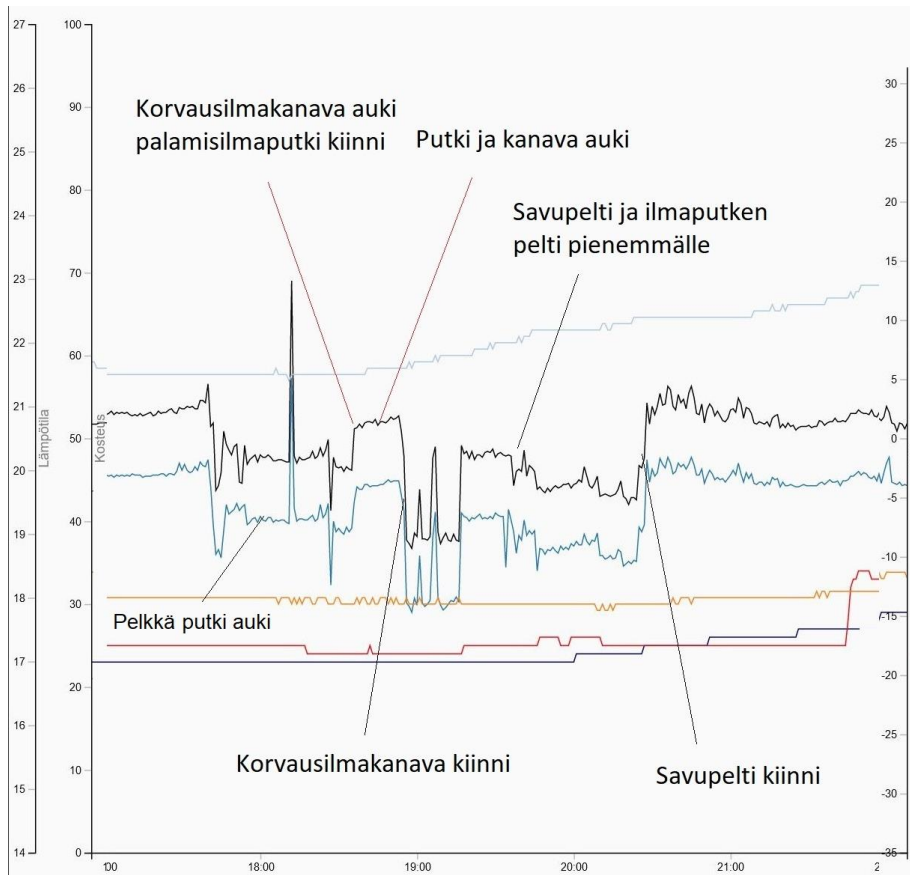
Tulisijan käyttöä simuloitiin testijaksolla useamman kerran erilaisissa olosuhteissa. Kuvasta 38 nähdään, miten paine-ero kehittyy eri tilanteissa tulisijan ollessa käytössä.



KUVA 38. Tulisijan käyttö ja sen vaikutus paine-eroon

Kuvaajasta näkyy selkeästi, miten tulisijan ja hormin lämmitessä paine-ero kasvaa samanaikaisesti. Palamisilmaputken sulkeminen vaikuttaa paine-eroon siten, että alipaineisuus huonetilassa ulkoilmaan nähden laskee ja palamisnopeus hidastui silmin nähden ja paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on enää noin 5 Pa alakerrassa ja yläkerrassa 1–2 Pa. Tässä testitilanteessa lämpötila ulkona oli noin -10 °C. Suurimmillaan paine-ero on tässä testitilanteessa noin 10 Pa sisäilman ja ulkoilman välillä.

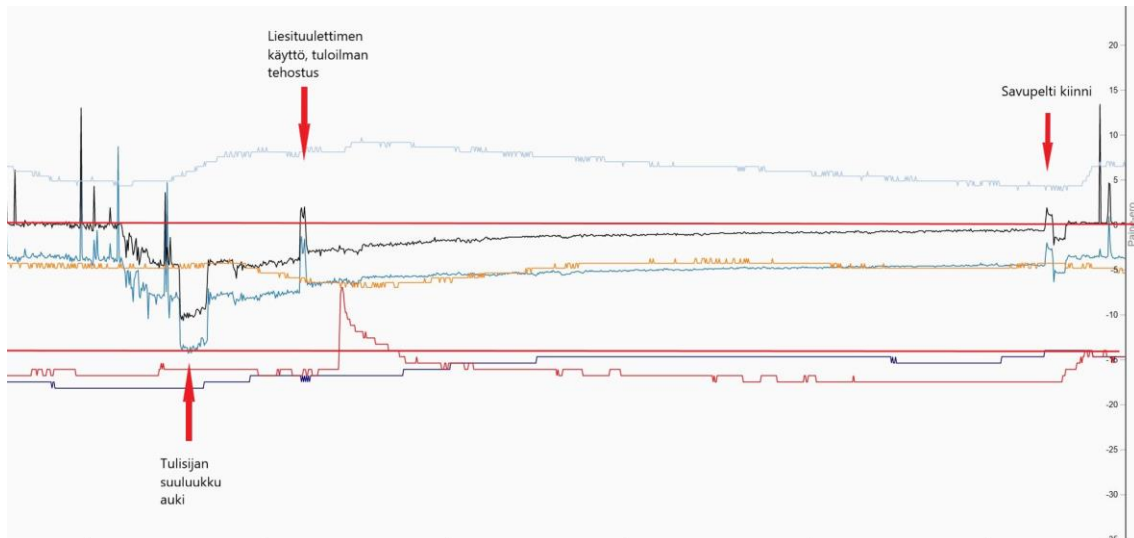
Kuvassa 39 nähdään vaikutukset, kun testattiin erilaisia tulisijan korvausilman toteutuksia ja niiden yhdistelmiä. Korvausilmareittinä käytettiin tulisijan alle tulevaa 110 mm:n korvausilmaputkea ja kattoon asennettua 160 mm:n korvausilmakanavaa.



KUVA 39. Tulisijan käyttö eri korvausilman toteutuksilla

Aluksi tulisijan korvausilmaputki takan alle on auki ja paine-ero rakennuksen vaipan yli on alakerrassa hieman yli 5 Pa. Korvausilmareitin vaihtaminen korvausilmaputkesta korvausilmakanavaan pienentää paine-eron alakerrassa noin 3 Pa:iin. Molempien korvausilmareittien ollessa auki, pienenee paine-ero alakerrassa vain hieman, mutta palamisnopeus kiihtyy samaan aikaan hieman. Suuluukun avaaminen kasvattaa paine-eroa selvästi ja paine-ero nousee alakerrassa jopa 12 Pa:iin. Polttovaiheen loppuajan takan suuluukku on auki makkaranpaiston vuoksi lähes yhtäjaksoisesti, minkä seurauksena alipaineisuus kasvaa. Suulukuun sulkeminen hetkittäin näkyy alipaineisuuden laskuna, kun korvausilmansaanti rajoittuu suuluukun kautta.

Kuvassa 40 nähdään, miten avoinna oleva tasaisesti jäähtyvä savuhormi vaikuttaa paine-eroon jäähtymisen seurauksena tasaisesti. Hormissa ilma pääsi kulkemaan termisen paine-eron vaikutuksesta sulkematta jääneen savupellin vuoksi. Kuvan mittausjakson aikaikkuna on noin 12 tuntia.

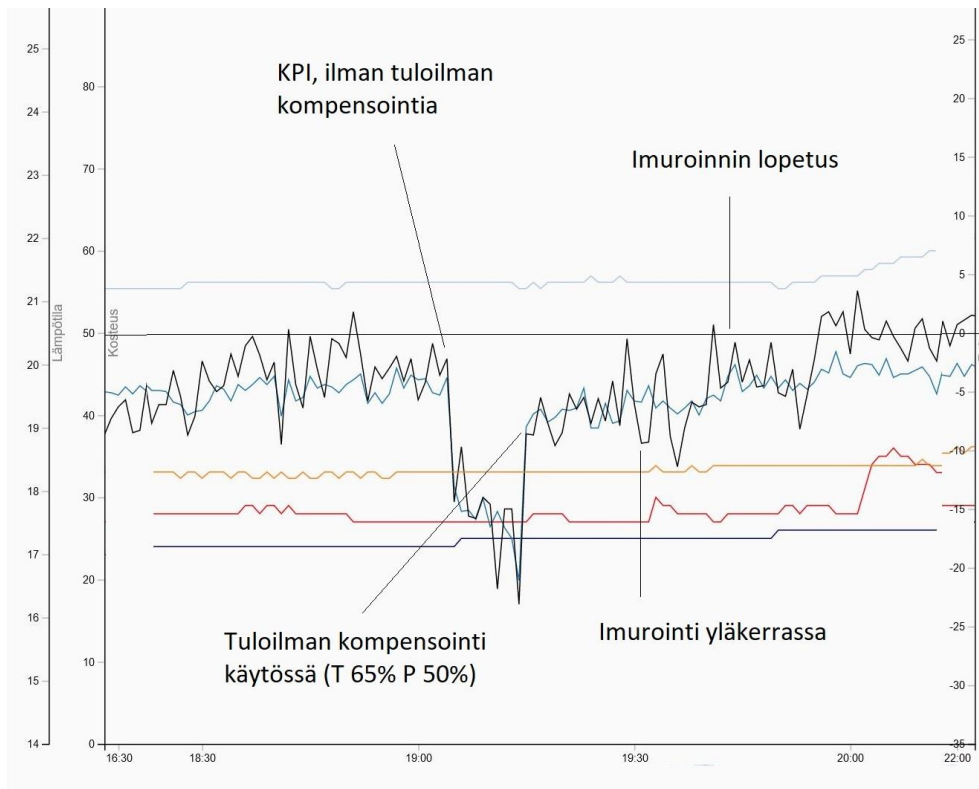


KUVA 40. Jäähtyvän savuhormin vaikutus paine-eroon

Yön yli auki unohtunut savupelti aiheuttaa savuhormin kautta vetoa ja muodostaa siten alipainetta rakennukseen. Hormin jäähtyessä alipaineisuus pienenee vastaavasti, eikä savuhormin sulkeminen vaikuta enää merkittävästi tilanteeseen aamulla. Pieni piikki loppuosalla savupellin sulkemisen jälkeen on aiheutunut liesituulettimen käytöstä. Savuhormiin ja tulisijaan varautunut lämpöenergia käytännössä siirtyi suurelta osin ilmavirran mukana ulkoilmaan sen sijaan, että olisi lämmittänyt asuinrakennuksen sisäilmaa.

### 5.3.3 Keskuspölynimuri

Keskuspölynimurin käyttötilanteita testattiin ilman tuloilman kompensointia ja ilmanvaihtokoneen tuloilman kompensoinnin ollessa käytössä. Rakennuksessa olevasta Flexit-keskuspölynimurista saatiin ilmanvaihtokoneelle kärkitieto lisäämällä kaapeli laitteiden väliin, kärkitieto on saatavilla laitteesta vakiona ilman erillisiä lisävarusteita. Imurin käytön vaikutus sisä- ja ulkoilman väliseen paineeroon nähdään kuvasta 41.



KUVA 41. Keskuspölynimurin vaikutus paine-eroon eri korvausilman toteutuksilla

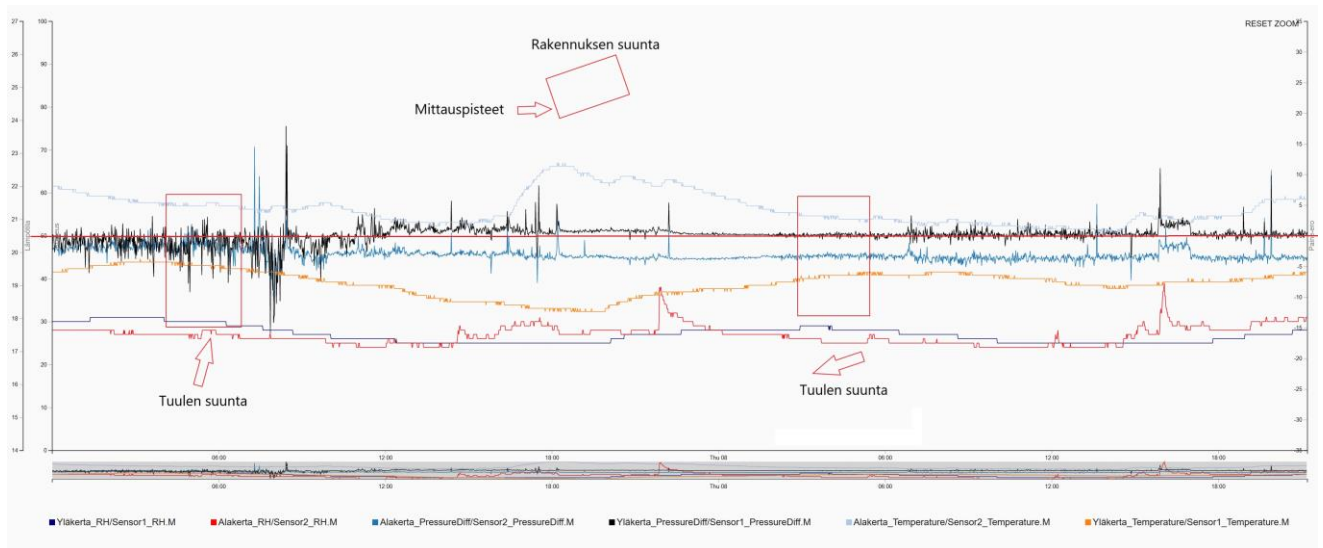
Imuroinnin alkaessa ilman tuloilman kompensointia muodostuu rakennuksen ylä- ja alakertaan lähes yhtä suuret paine-erot ulkoilmaan nähden. Paine-ero on suurimmillaan noin 25 Pa ja tuloilman kompensoinnin käyttöönoton jälkeen noin 5 Pa. Ilmanvaihtokoneen tehostusasetukset oli asetettu siten, että tuloilmapuhaltimen asetusarvo oli 65 % ja poistoilmapuhaltimen asetusarvo 50 %. Testijaksolla tuuli oli noin 4 m/s etelän suunnasta, mikä näkyy trendiviivan huojunnalla. Tuloilman kompensoinnin lisäämisen jälkeen imurointi on jatkunut alakerrassa ja myöhemmin siirtynyt yläkertaan. Kuvaajasta ei pysty tulkitsemaan varmuudella onko yläkerrassa imurointi lisännyt yläkerran paine-eroa samalla hetkellä vai onko paine-eron nopea muutos tuulen aiheuttama.

#### 5.3.4 Tuuli

Tuulen voimakkuuden ja säätiöjen arvioimisessa käytettiin pääasiassa työssä avoimeen dataan perustuvaa Oulun yliopiston selainpohjaisen Hofu-y-sääsaman mittaustietoja. Maasto mittauskohteena olevan rakennuksen ympäristössä on avointa ja kauempana sijaitsevat viralliset mittauspisteet eivät vastaa todellisia olosuhteita kaikissa tilanteissa luotettavasti pitkän välimatkan ja erilaisen maaston vuoksi. Työssä käyttämäni sääasema sijaitsee vain noin 4 km etäisyydellä tämän työn

kohteena olevan rakennuksen mittauspaikkaa, joten aseman mittausarvoja voidaan pitää vastaavana sijainnin suhteen. Takautuvasti tietoja haettiin myös ilmatieteenlaitoksen avoimesta säätietokannasta lähimmältä mittausasemalta, minne suora etäisyys on noin 25 km.

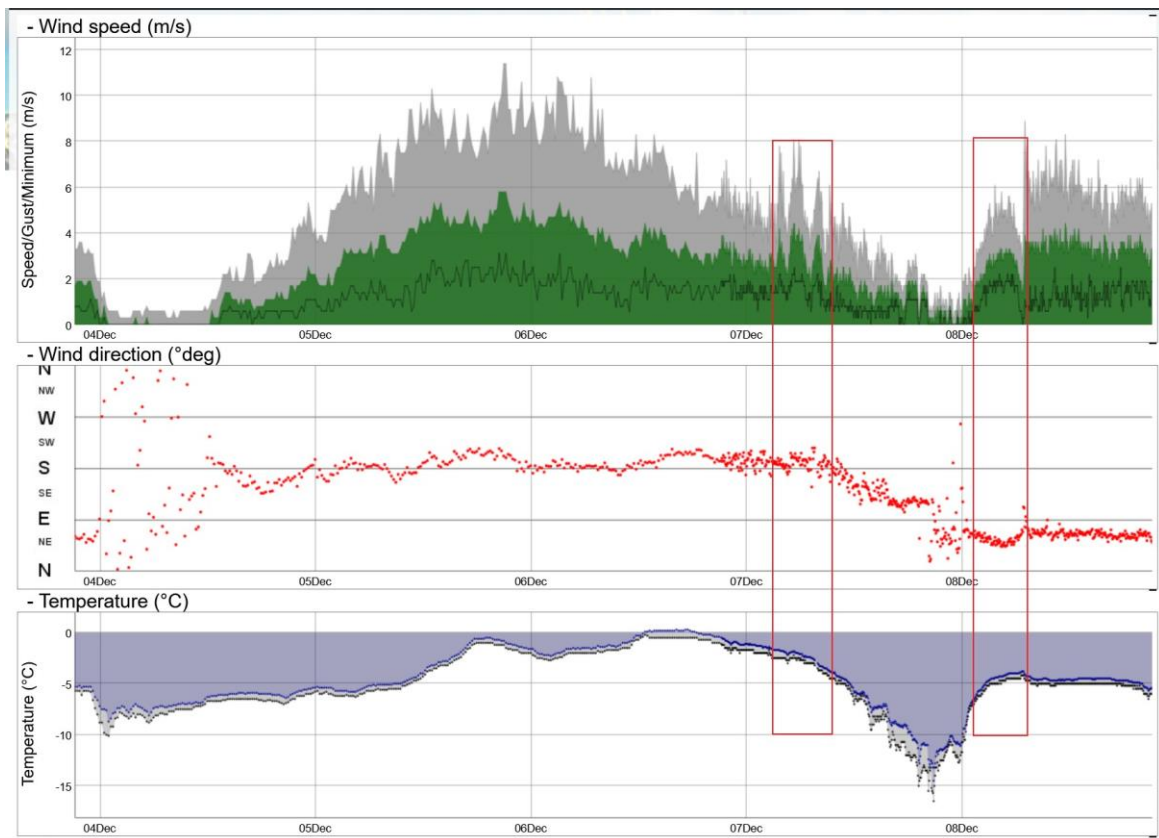
Mittausdatasta nähdään miten tuulen suunta vaikuttaa mitattavan julkisivun ja sisäilman välisiin painesuhteisiin. Kuvassa 42 on merkitty tuuliolosuhteiltaan ja ulkolämpötiloiltaan kaksi hyvin samantyyppistä tilannetta muutaman tunnin ajalta, mutta tuulen suunta on kääntynyt.



KUVA 42. Tuulen suunnan vaikutus paine-eroon

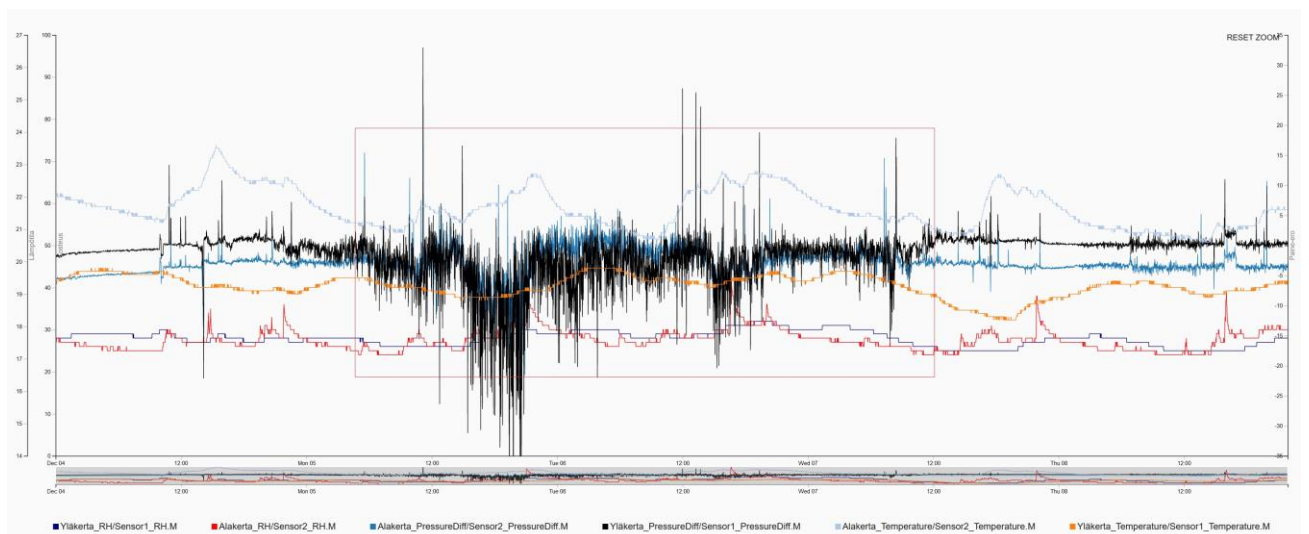
Kuvaajasta nähdään miten tuuli aiheuttaa mittauspistettä kohden suuntautuessaan erittäin rajua huojuntaa painesuhteissa sekä aiheuttaa sisälle hieman suuremman alipaineen kohdistuessaan mittausrivulle. Tuulen kääntyessä mittauspisteen vastakkaiselle julkisivulle mittautrendi on selkeämpää ja tasaisempaa. Tuulen suuntautuessa itä-koillisuunnasta aiheuttaa mittauspuolella julkisivun ulkopuolelle voimakkaamman alipaineen, joten sisä- ja ulkoilman painesuhde muuttuu tasapainotilanteeseen tai hieman sisäilman osalta ylipaineiseksi yläkerrassa. Tuulen sisäilmaan aiheuttama yli- tai alipaine on kuitenkin tässä tilanteessa kohtuullisen maltillinen vaihdellen -10 Pa:n ja +5 Pa:n välillä. Tuulen nopeus esitettyllä mittausjaksolla vaihteli välillä 2–8 m/s.

Tuulen suunta- ja nopeuskuvaaja nähdään samaan aikaan kuvassa 43 samassa aikaikkunassa. Kuvaajan perusteella yllä mainitut tilanteet vastaavat hyvin toisiaan tuuliolosuhteiden ja ulkolämpötilan osalta vain tuulen suunnan vaihtuessa.



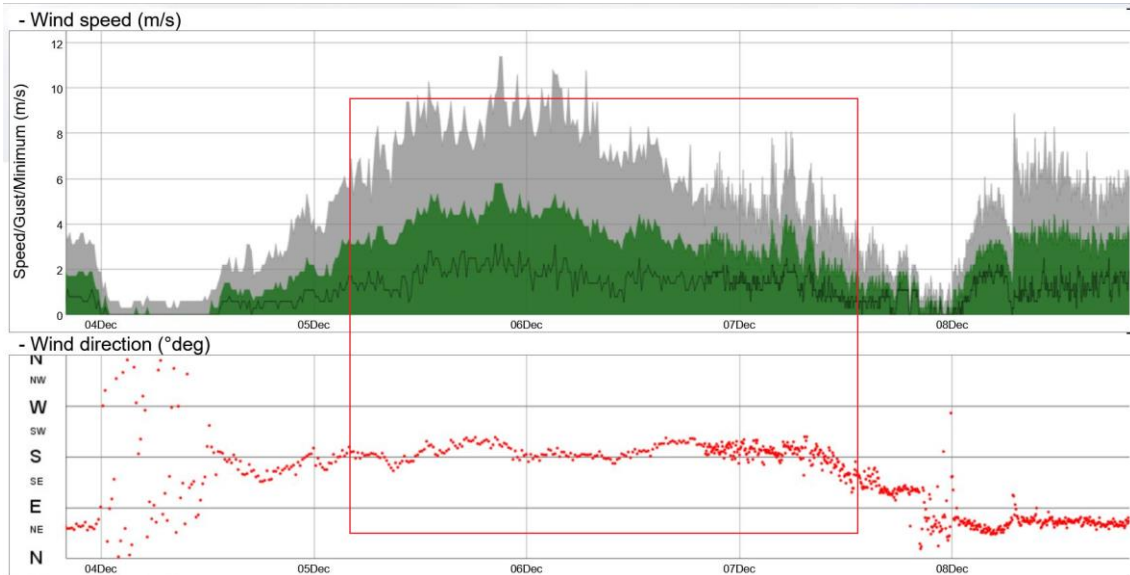
KUVA 43. Tuuliolosuhteiden kuvaaja tuulen suunnan vaihtuessa

Mittausjaksolle sattui myös runsaasti tuulisia päiviä. Kova ja puuskittainen tuuli aiheuttaa mittausdataan erittäin suuria poikkeamia ja vaihteluita. Kuvasta 44 nähdään miten lähes kaksi vuorokautta kestänyt voimakas puuskittainen tuuli aiheuttaa suurimmillaan noin +/- 30 Pa:n vaihtelua sisä- ja ulkoilman välisessä painesuhteessa.



KUVA 44. Tuulen aiheuttama paine-ero

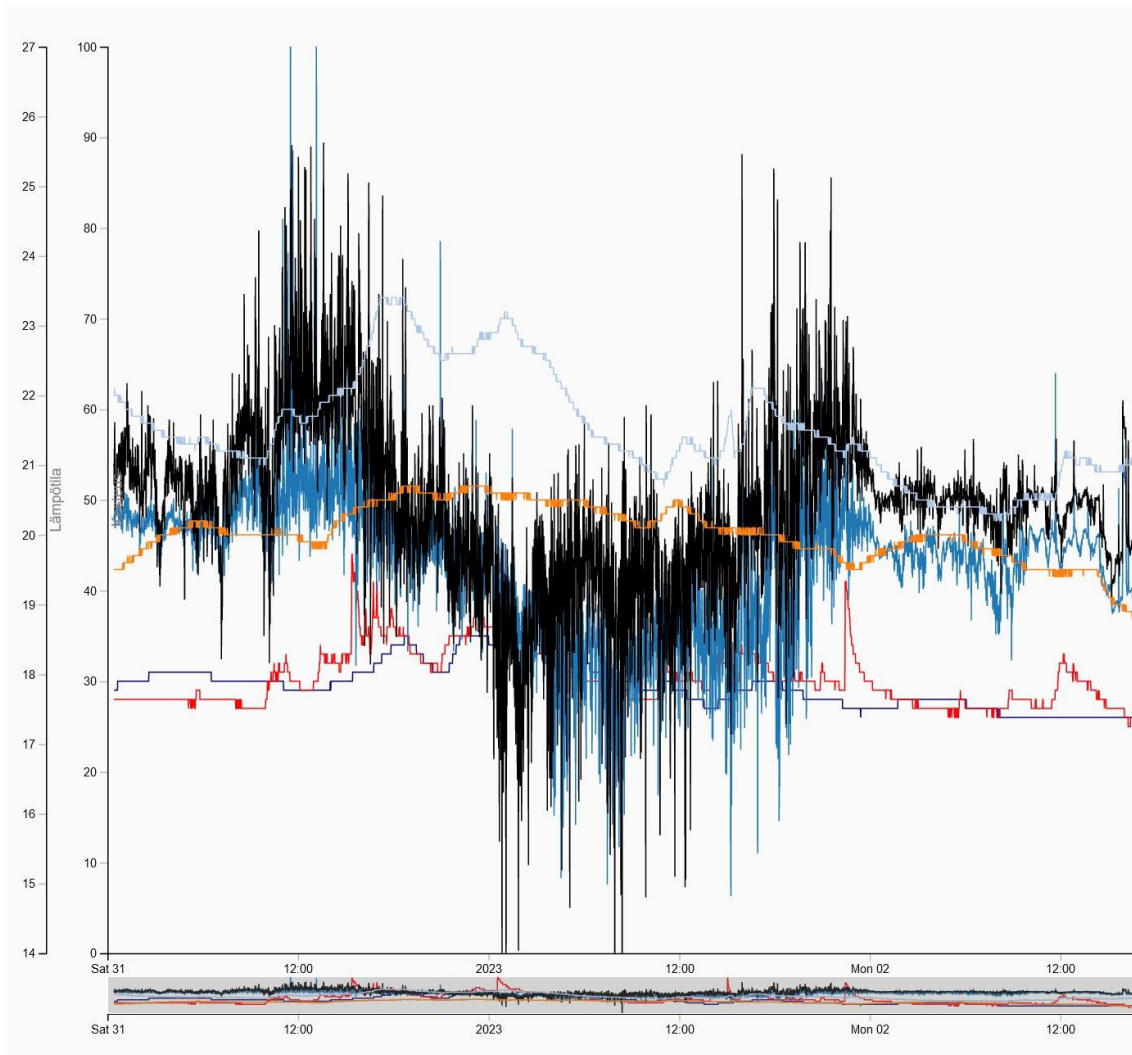
Kuvasta 45 nähdään miten voimakkaat puuskittaiset voimakkuudeltaan jopa 10 m/s näkyvät selvästi mittausjanalla vastaavana piikkinä. Vaikka jatkuva tuulen voimakkuus on vain 4 m/s, aiheuttaa puuskittainen tuuli ajoittain suuren paine-eron.



KUVA 45. Tuulen suunta ja voimakkuus

Tuulen suunnan muutokset vaikuttavat kuvaajan muotoon ali- ja ylipaineen korostumisena, riippuen kohdistuuko tuuli mittausjulkisivuun mistä suunnasta. Pääasiassa tuuli kohdistuu lähes mittauspisteiden sivua vasten etelän suuntaisena ja siten alipaineisuus suurenee sisäpuolella seinää. Mittausjakson lopussa näkyvä voimakas tuuli ei näy paine-erossa vastaavasti, koska tuulen suunta on vaihtunut etelän suunnasta koillistuuleksi.

Kuvasta 46 näkyy erään testivuorokauden aikana vaikuttanut voimakas tuuli, joka kääntyi lyhyessä ajassa 130 astetta. Kuvaajan huiput ovat noin. 35 Pa yli- ja alipainetta. Säädatan perusteella kuvaajan huiput ja tuulen suunnan lakipisteet ovat selkeässä linjassa keskenään.



KUVA 46. Tuulen suunnan vaikutus paine-eroon

Koko mittausjakson suurin paine-ero oli tuulen aiheuttama, suuruudeltaan noin 115 Pa. Mittaushetkellä tuuli puhalsi lähes kohtisuoraan mittausantureita kohden ilmatieteenlaitoksen säähistoriasta tarkasteltuna. Tuulen nopeus lähimmällä ilmatieteenlaitoksen mittauspaikalla oli mittaushetkellä puuskissa noin 14 m/s ja jatkuvana 6 m/s. Alakerran mittausanturille vastaavaan aikaan mitattiin noin 35 Pa:n paine-ero, mittausanturi on lasitetulla terassilla. Saman vuorokauden aikana mitattiin yläkerran anturilla 5 mittausta, joiden arvo oli yli 80 Pa, mittausväli oli 1 min.

### 5.3.5 Painovoimaisen ilmanvaihdon venttiilit

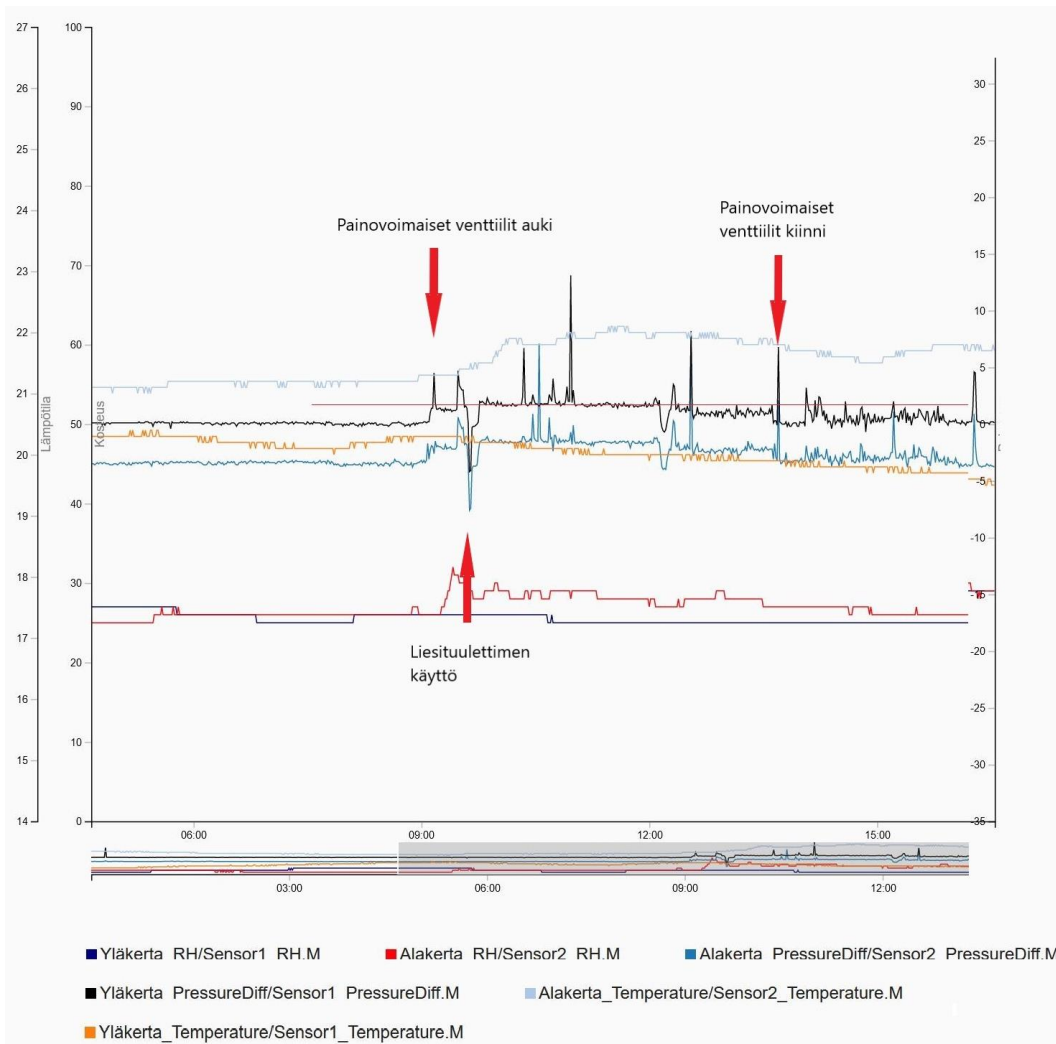
Rakennuksen tiiveyttä ei ole mitattu, mutta tiiveys voidaan olettaa olevan lähellä yleistä keskiarvoa, koska tiiveyteen on kiinnitetty erityistä tarkkuutta rakennusvaiheessa. Rakennuksen kaikki ilma-

vaihtokanavisto on tehty pääasiassa alakattoihin, jolloin ilmansulkupaperin lävistyksset on minimoitu. Rakennuksen teknisessä tilassa on oveen sijoitettuna kaksi 100 mm:n painovoimaista ilmanvaihtoventtiiliä, joilla simuloitiin tiiveyden merkitystä testimielessä. Tekninen tila on alakattojen kautta yhteydessä rakennuksen muuhun ilmatilaan, joten paine-erot tasoittuvat luonnostaan. Kuvassa 47 näkyy toinen ovessa olevista TAV-venttiileistä, venttiili oli testijaksolla auki noin 3–4 mm.



*KUVA 47. Ulko-oven ilmanvaihtoventtiili TAV-100*

Kuvasta 48 nähdään, miten paine-ero muuttuu venttiilien avaamisen seurauksena ja alipaine sisä- ja ulkoilman välillä pienenee nopeasti. Venttiilien sulkeminen vaikuttaa vastaavasti siten, että paine-ero muuttuu suuremmaksi koska rakennuksen vaippa on tiiviimpi.



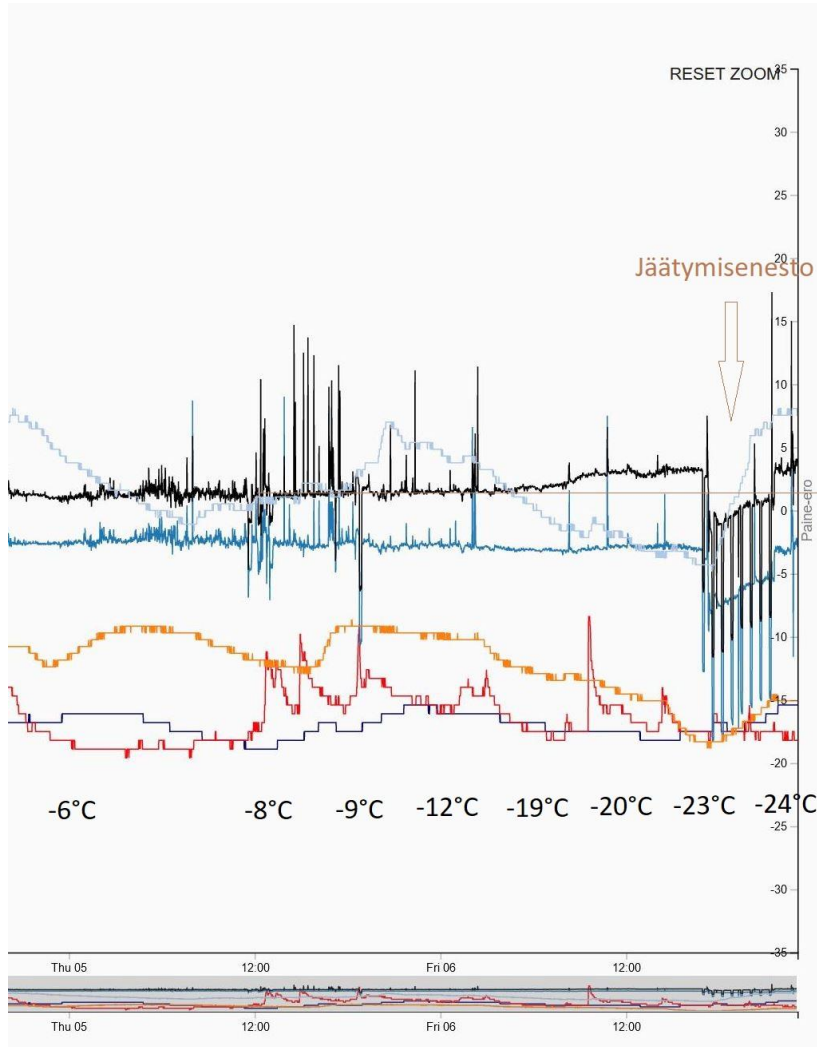
KUVA 48. Painovoimaisten ilmanvaihtoventtiilien vaikutus paine-eroon

Painovoimaisten venttiilien avaamisen jälkeen sisäilman alipaineisuus laskee, eli paine-ero pienenee ja yläkerta muuttuu jopa ylipaineiseksi ulkoilmaan nähden. Piikki venttiilien avaamisen jälkeen on aiheutunut liesituulettimen käytöstä ja on voimakkuudeltaan noin 7 Pa.

### 5.3.6 Kylmät olosuhteet

Mittausjakson aikana talvi oli tavanomaista lämpimämpi eikä pitkiä pakkasjaksoja ollut käytännössä lainkaan. Kuvasta 49 nähdään, miten pakkasen kiristyminen näkyy paine-erossa erään vuorokauden aikana. Lähimmän virallisen sääaseman mittausdatan perusteella mittaustilanteen alle -15 asteen lämpötila kesti yhtäjaksoisesti reilun vuorokauden ja alimmillaan lämpötila oli -23,8 astetta.

Rakennuspaikalla mitattu lämpötila oli 2–3 astetta alaisempi kuluttajamittarilla mitattuna. Ilmanvaihtokoneen jäätymisenestoasetukset asetettiin tarkoituksella mahdollisimman passiiviseksi, jotta koneeseen saadaan kerrytettyä jäätä häiriötilannetta simuloimaan.



KUVA 49. Kylmien olosuhteiden vaikutus paine-eroon

Pakkasen kiristyessä nähdään kuvaajasta, että alipaineisuus pienenee, ja yläkerrassa paine sisäilmassa on ylipaineinen ulkoilmaan nähden. Jäteilmän lämpötilan laskettua -12 asteeseen, ilmanvaihtokoneen automatiikka sulattaa kennoa jaksottain muuttamalla puhallinnopeuksia sulanapitoasetuksen mukaisesti. Jokaisen sulatusjakson jälkeen paine-ero hieman muuttuu hieman enemmän alipaineisemmaksi. Sulatusjakson jälkeen ilmanvaihtokone avattiin ja tarkistettiin jäänmuodotuksen osalta. Kuvasta 50 nähdään, miten jäteilmakammioon on kertynyt pehmeää jäähilettä.



*KUVA 50. Jäähileen kertyminen ilmanvaihtokoneen jäteilmakammioon*

Jäähileet poistettiin jäteilmakammioista ja samalla raitisilmasäleikkö puhdistettiin kuurasta. Kertymä ulkoilmasäleikössä oli kohtuullisen vähäistä, mutta silmin nähden havaittavaa. Kuvassa 51 YGC-250 -säleikkö ennen puhdistamista.

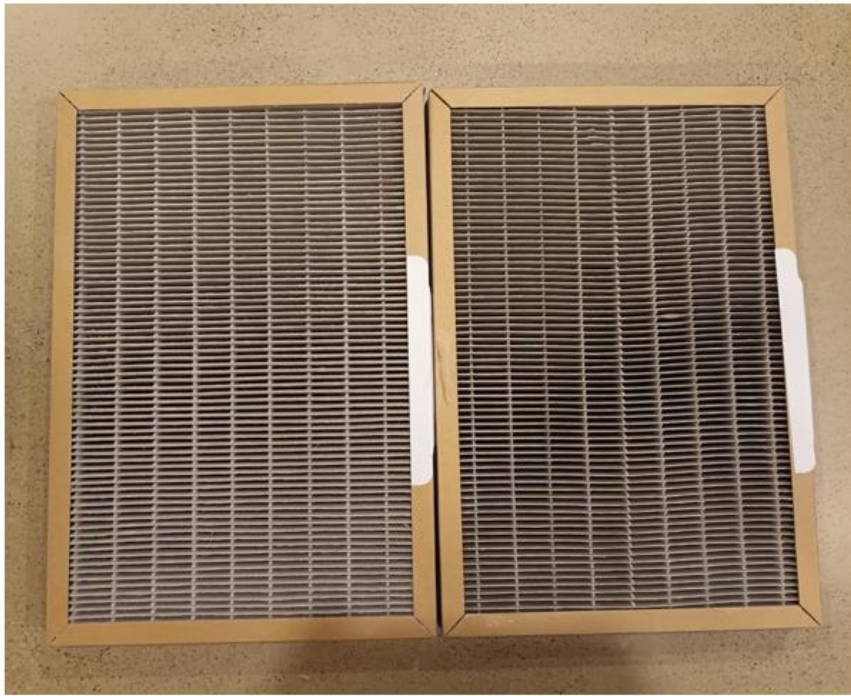


*KUVA 51. Raitisilmasäleikköön kertynyt jäähile*

Puhdistustoimenpiteiden jälkeen seurattiin vaikutusta paine-eroon, mutta merkittävää selkeää muutosta paine-erotrendissä ei havaittu, kun häiriötekijät oli poistettu.

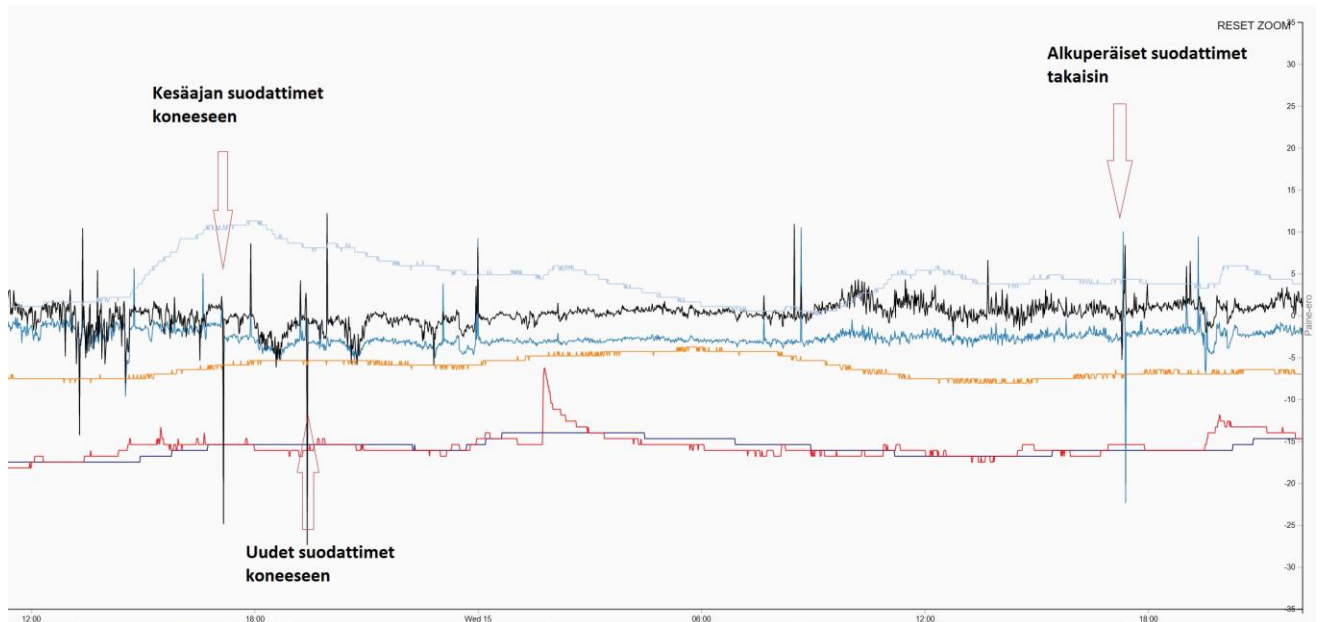
### **5.3.7 Ilmanvaihtokoneen suodattimet**

Suodattimien paine-eron kasvamista eri tilanteissa testattiin käyttämällä koneessa kolmenlaista suodatinsarjaa käyttöhistorian mukaan. Ensimmäinen sarja on ollut käytössä talviaikana muutama kuukauden, toinen sarja on ollut aiemmin noin puoli vuotta käytössä kesän aikana ja viimeinen suodatinsarja on uusi ja käyttämätön. Kesäaikainen suodatinsarja on ollut käytössä ajallisesti pitemmän aikaa ja tuloilmasuodatin on haljennut osittain. Kesäajan suodattimista tuloilmasuodatin on kerännyt selvästi enemmän likaa, kun taas talviajan tuloilmasuodatin on kohtuullisen puhdas, mutta talvisarjan poistoilmasuodatin on kerännyt paljon hienoa pölyä. Talviajan ePM1 55 % -luokan suodattimet ennen imurointia näkyy kuvassa 52.



KUVA 52. Talvijakson käytetyt tulo- ja poistoilmasuodattimet, oikealla poistoilmasuodatin

Kolmen suodatinsarjan vaikutus paine-eroon näkyy kuvassa 53.



KUVA 53. Eri suodatinsarjojen vaikutus paine-eroon

Kuvaajan alussa koneessa on syksyllä vaihdetut suodattimet, jotka on olleet käytössä noin kolme kuukautta. Kesäajan suodattimien asennus näkyy kuvaajassa siten, että alipaineisuus on kasvanut

noin 2 Pa. Uusien suodattimien vaihto ei kuvaajan perusteella vaikuta juurikaan, mutta tuloilmasuodattimessa oli halkeama, mikä vaikuttaa suodattimen aiheuttamaan paine-eroon hieman. Lopuksi koneeseen asennettiin takaisin talven käytössä olleet suodattimet, mutta ne imuroitiin ennen takaisinlaittoa. Tuloilmasuodattimeen ei juurikaan ollut likaa kertynyt, mutta poistoilmasuodattimessa oli jonkin verran silmin nähtävää hienoa huonepölyä. Kuvaajan perusteella paine-ero muuttuu hieman vähemmän alipaineiseksi, mutta ei palaa täysin alkuperäiselle linjalle imuroidun suodattinsarjan asennuksen jälkeen. Tuuliolosuhteet olivat testin aikana kohtuullisen vakaasti 1 m/s etelätuulta.

### 5.3.8 Ilmanvaihtokoneen vakiopainesäätö

Ilmanvaihtokonevalmistajalla on rakennuksessa olevaan koneeseen saatavilla lisävaruste, jolla koneen puhaltimien ohjaus voidaan muuttaa vakionopeusohjauksesta kanavapaineohjaukseen. Lisävaruste oli helppo asentaa ja suhteellisen edullinen hankintahinnaltaan. Laite tarvitsee tavallisen pistotulppaliitännän muuntajalle sekä modbus-kaapelin ilmanvaihtokoneeseen liitettäväksi, nämä tulevat lisävarusteen mukana. Paineindikointiletkut liitetään tulo- ja poistoilmakanavistoon haluttuun kohtaan ja yhdistetään toisesta päästä CI 80 -ohjausyksikköön. Ohjausyksikkö CI 80 näkyy kuvassa 54.



*KUVA 54. Vakiopaineohjauksen ohjausyksikkö Flexit CI 80 (36)*

Indikointiletkujen sijoituksessa oli hieman haasteita saada mittaletkut kanavistoon sellaiseen kohtaan, missä virtaus on riittävän häiriötöntä, koska kanaviston osat aiheuttavat virtaukseen pyörteitä. Teknisessä tilassa kanavistoa on rajallisesti näkyvissä, joten häiriöttömän mittauspaikan löytäminen vaati hieman kokeilua. Ohjausyksikkö muuten oli helppo asentaa ja vakiopainesäädön tavoitepaineet asetettiin vastaamaan samoja puhaltimien pyörimisnopeuksia, kun aikaisemmin ohjaustavan ollessa pyörimisnopeusperusteinen. Asetusmuutokset ilmanvaihtokoneeseen tehtiin Flexit GO -mobiilisovelluksella.

Tuulettoman sään vallitessa tehtiin testi, jossa seurattiin suodattimien tukkeutumisen aiheuttamia olosuhdemuutoksia ja niiden vaikutusta sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon kanavapaineohjauksella. Aluksi suodattimet teipattiin noin 30 %:n alalta umpeen, millä simuloitiin suodattimien tukkeutumista. Teipattu suodatin on esitetty kuvassa 55.



*KUVA 55. Osittain peittoon teipattu suodatin*

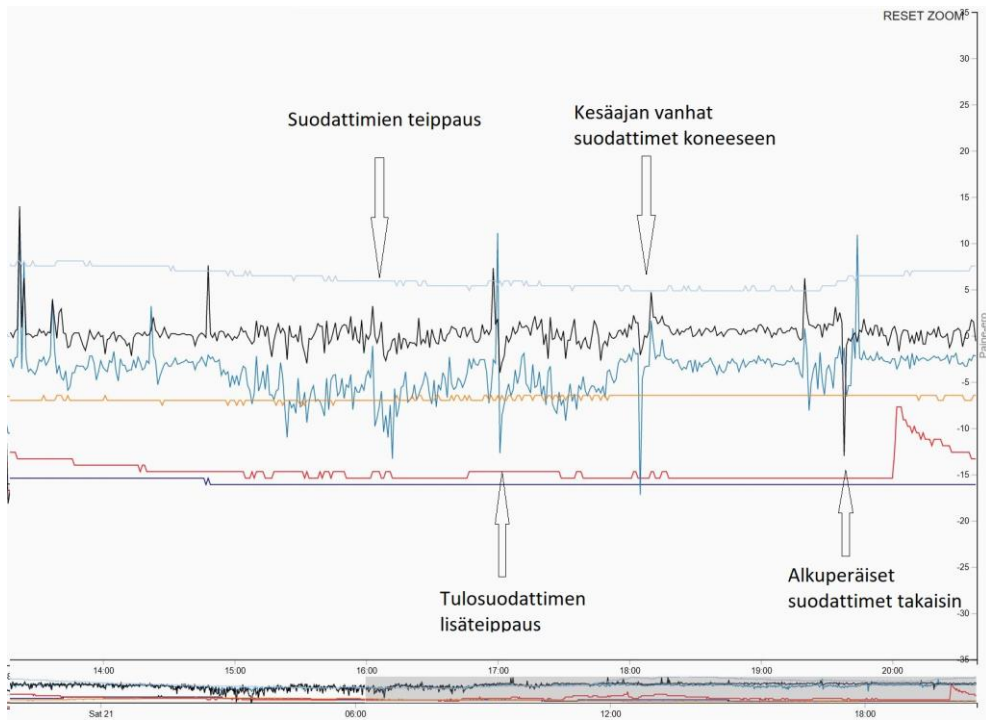
Testin edetessä tehtiin tulosuodattimeen lisäteippaus, mutta jätettiin poistoilmasuodattimeen alkuperäinen maltillisempi teippaus. Tuloilmasuodattimen lisäteippaus näkyy kuvassa 56. Koneen käyttötietoja seurattiin reaaliajassa internetin yli laitteen sovelluksella ja tuloilmasuodattimen paine-eron

kasvaminen näkyi myös puhallinnopeudessa, ollen noin 10 % korkeampi, kuin poistoilmapuhaltimen.



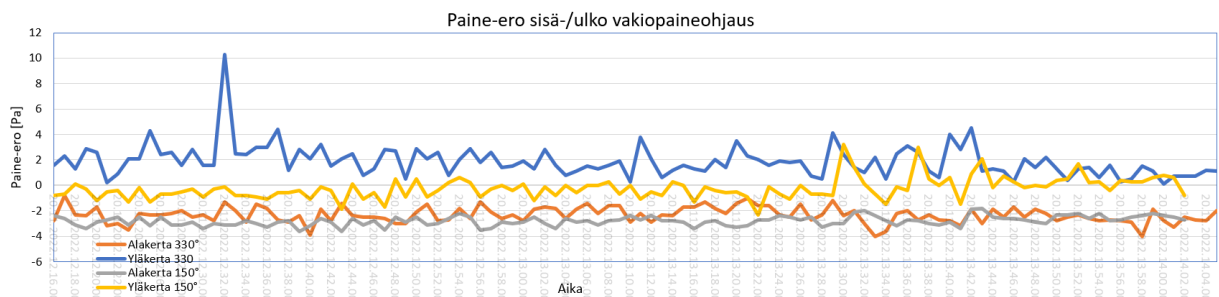
*KUVA 56. Tuloilmasuodattimen lisäteippaus testin toisessa osassa*

Viimeiseksi palattiin alkuperäiseen versioon, missä suodattimet olivat muutaman kuukauden vanhat. Kuvan 57 perusteella laitteisto säätää puhallinnopeuksia paineperusteisesti niin tarkasti, ettei painekuvaajasta käytännössä näe eroja näiden häiriötekijöiden välillä. Suodattimen vaihdon yhteydessä näkyvät piikit tulee koneen sammuttamisesta ja uudelleenkäynnistyksestä. Ennen testiäkin näkyvä huojunta tulee tuulen vaikutuksesta, joka laantui testin edetessä.



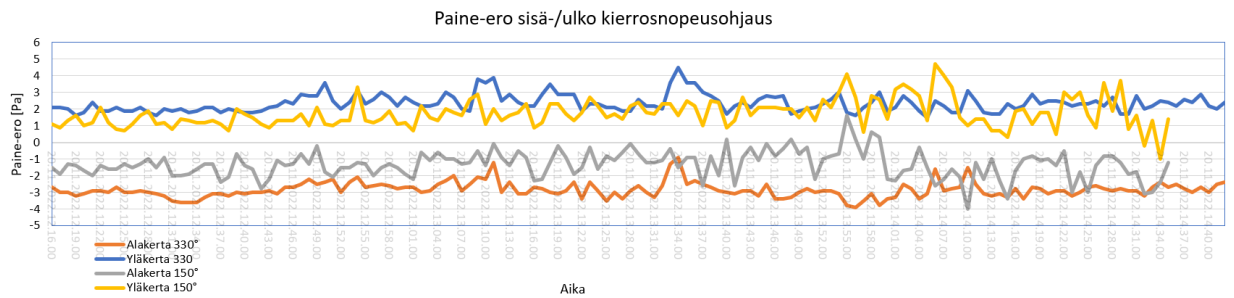
KUVA 57. Tuloilmasuodattimen lisäteippaus testin toisessa osassa

Vakiopainesäädön korjaavaa vaikutusta tarkasteltiin myös tuulen suunnan muuttuessa. Kohteen ulkoilmanotto ja jäteilman puhallus ovat molemmat samalla seinällä, joten tuulen kohdistuessa tätä seinää vasten, muodostuu tuulen paineesta myös ilmanvaihtoon teoriassa ylipaineisuutta. Kuvassa 58 nähdään noin 2 m/s jatkuvan ja noin 2–4 m/s puuskittaisen tuulen vaikutuksen vallitessa. Tuulitiedot ovat lähimmältä ilmatieteenlaitoksen viralliselta mittauspaikalta, joka sijaitsee noin 25 km:n päässä rakennuksesta. Etäisyys ja sen aiheuttama epätarkkuus on huomioitava tuloksia tulkittaessa. Tuulen suunta 330 ° on kohtisuoraan raitisilmanoton seinää vasten ja 150 ° päinvastaiselle seinälle.



KUVA 58. Tuulen suunta ja paine-ero kanavapaineohjauksella

Vakiokierrosnopeuksella ilmatieteenlaitoksen historian perusteella liki samanlaisen sääolosuhteen vallitessa painesuhteiden vaikutus näkyy kuvassa 59.



KUVA 59. Tuulen suunta ja paine-ero kierrosnopeusohjauksella

Kuvaaja verratessa nähdään, että vakiopaineohjauksella ei juurikaan ole eroa perinteiseen kierrosnopeusohjaukseen, mutta nähtävissä on etenkin alakerran käyrltä vakiopaineohjauksen painetta säätävä ominaisuus, jolloin tuulen suunnan muuttuessa paine-ero ei juurikaan muutu. Ilmanvaihtokoneen valmistajan selainpohjaisen diagnostiikkapalvelun historiatietojen perusteella nähdään puhaltimien kierrosnopeudet taulukosta 5, tuulen suunnan mukaan vastaavaan aikaan, kun kuvassa 58 ja 59.

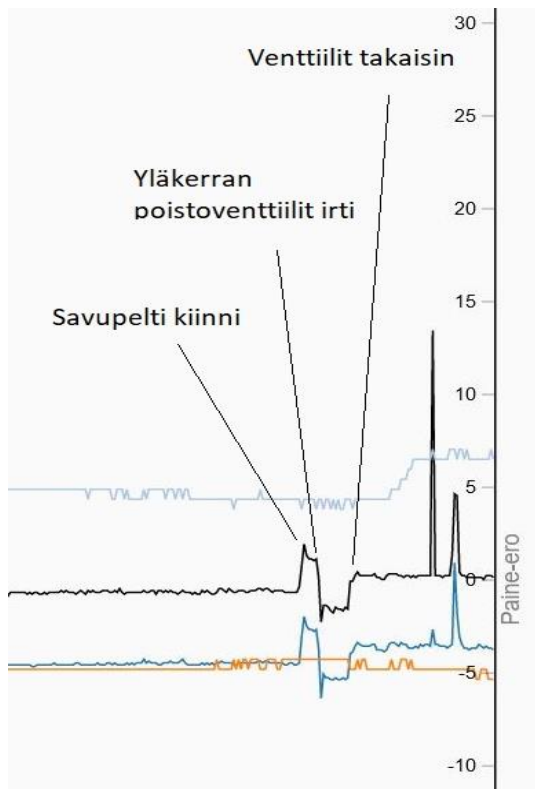
TAULUKKO 5. Puhaltimien kierrosnopeudet tuulen suunnilla 330° ja 150° ja eri ohjauksilla

Puhallinnopeusohjaus	Tulo	Poisto
330° deg	2490	2510
150° deg	2500	2570
Vakiopaine	Tulo	Poisto
330° deg	2470	2600
150° deg	2500	2600

Taulukon mukaan tulo- ja poistoilmapuhaltimien nopeuksissa ei ole juurikaan eroa tuulen suunnan vaihtuessa tuulen nopeudella 2 m/s. Taulukon mukaan vakiopaineohjaustavalla poistoilmapuhaltimen nopeus muuttuu 60 rpm, kun tuulen suunta vaihtuu 180 astetta. Tuulen muodostama alipaine ulospuhalluslaitteen seinälle lisää poistoilmapuhaltimen kierroksia, mutta vakiopaineohjaus säättää ohjausjännitettä pienemmälle vastaavassa tilanteessa, eikä puhaltimen kierrosnopeus muutu.

### 5.3.9 Koneellinen tavanomainen ilmanvaihto

Ilmanvaihdon säätöön ei perehdytty tutkimuksessa tarkemmin, vaan keskityttiin tutkimaan normaalin asumisen ja tähän liittyvien toimintojen vaikutuksia paine-eroihin. Testausjaksolla kokeiltiin korostetusti tilannetta, että yläkerrasta on ilmanvaihdolla poistettu reilusti suurempi poistoilmamäärä kuin alakerrasta. Kuvasta 60 näkyy, kuinka paine-ero muuttuu, kun yläkerrasta poistetaan kolme päätelaitetta ja putken päät jäävät avoimeksi.



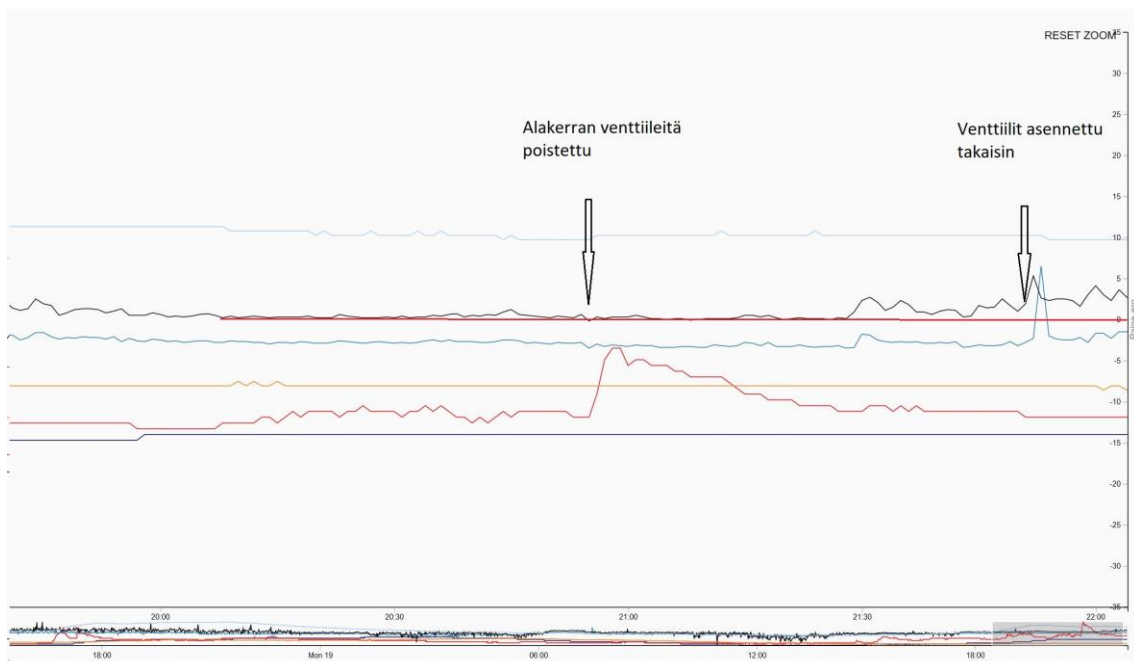
KUVA 60. Ilmanvaihtopäätelaitteiden poistaminen ja sen vaikutus paine-eroon

Takan lämmityksen jälkeen takan savupelti on suljettu ja tämän jälkeen poistoventtiilit yläkerrasta irrotettu. Paine-ero muuttuu tasaisesti ylä- ja alakerrassa, eikä yläkertaan muodostu merkittävästi suurempi paine-ero alakertaan nähden. Kokonaispaine-eron muutos on vain noin 2 Pa. Erikseen ei mitattu paljonko poistoilmavirta yläkerrassa oli suurempi suhteessa tuloilmavirtaan. Avoin poistoilmakanavan imuaukko näkyy kuvassa 61.



KUVA 61. Irrotettu poistoilmaventtiili ja avoin poistoilmakanava

Sama testi suoritettiin alakerrassa poistamalla kolme venttiiliä kokonaan irti, jolloin poistoilmavirran voidaan olettaa lisääntyvän näistä avoimista putkista suhteessa kanaviston muihin venttiileihin. Paine-eron muutokset nähdään kuvasta 62.



KUVA 62. Ilmanvaihtopäätelaitteiden poistaminen ja sen vaikutus paine-eroon

Paine-ero ei juurikaan muutu koko rakennuksen osalta, eikä alakerran paine-ero kasva suhteessa yläkerran paine-eroon juuri lainkaan, nähtävissä on alle 1 Pa:n vaikutus paine-erossa alakerran osalta. Nämä alakerran poistoventtiilit sijaitsevat lähempänä ilmanvaihtokonetta, kun yläkerran venttiilit, joten vaikutus pitäisi olla oletettavasti merkittävämpi poistoilmavirran kasvun osalta näistä venttiileistä. Välittömästi venttiilien asennuksen jälkeen näkyvä paine-eron nousu on tullut ulko-oven sulkemisen seurauksena. Testin aikana tuuli oli noin 2 m/s, mutta suunta oli vaihteleva etelän, lännen ja pohjoisen välillä, mikä aiheuttaa jonkin verran huojuntaa mittausdatassa. Tuuli aiheuttaa-kin painekuvaajaan selvästi suuremman vaikutuksen, kuin venttiilien poisto.

Ilmanvaihdon osalta tehtiin vielä testi, jossa koko kone sammutettiin ja jäte- ja ulkoilmakanava tuhkittiin ilmanvaihtokoneen sisällä. Kuvasta 63 nähdään, miten paine-ero on muuttunut koneen sammuttamisen jälkeen.

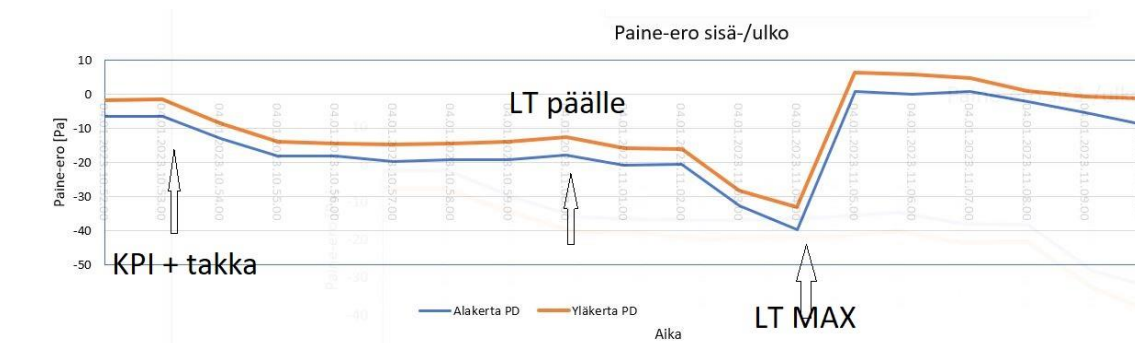


KUVA 63. Ilmanvaihdon vaikutus paine-eroon

Kuvan paine-erokäyrän muutoksen perusteella ilmanvaihto vaikuttaa alipaineen muodostumiseen vallitsevilla säädöillä noin 2–3 Pa:n verran, muodostan lievän alipaineen rakennuksen sisälle. Ilmavirtojen säätö ja mitoitus talossa on pyritty suunnittelemaan ja tekemään muutaman litran verran alipaineiseksi. Olosuhteet testitilanteessa olivat ulkoilman osalta -10 °C ja tuulen nopeus noin 2 m/s idän suunnasta.

### 5.3.10 Yhtäaikainen käyttö

Testausjaksolla simuloitiin tilannetta, jossa asukas aiheuttaa toiminnallaan rakennukseen mahdollisimman suuren alipaineen tavanomaisella asumiseen liittyvällä toiminnalla. Aluksi käytettiin tulisiijaa siten, että keskuspölynimuria käytettiin yhtäaikaisesti ilman korvausilman toteutusta tai kompensointia. Tilanteen stabiloiduttua käynnistettiin liesituuletin myös ilman korvausilmaa asteittain aina maksimitehoon saakka. Turvallisuuden varmistamiseksi häkäpitoisuutta mitattiin huoneilmasta samaan aikaan, jotta mahdollisen häkäpitoisuuden nousu havaittaisiin ja testin toteuttaminen olisi turvallista. Tulisijan alle tuleva korvausilmaputki oli koko testijakson auki turvallisuussyistä. Kuvasta 64 nähdään, miten paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä muuttuu testin edetessä.



KUVA 64. Ilmanvaihdon vaikutus paine-eroon

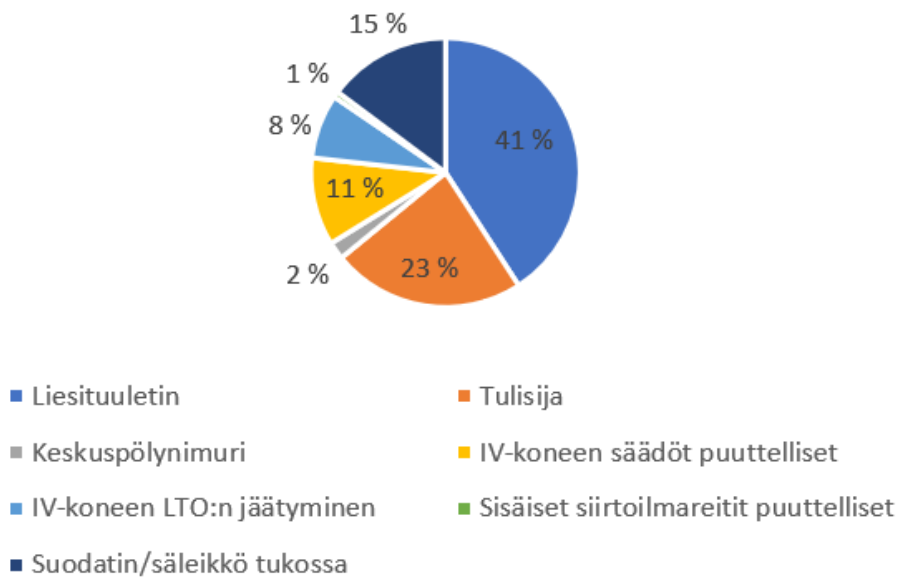
Paine-ero laskee asteittain ja käy noin 40 Pa:n tasolla, kun testi keskeytettiin. Todellinen huipputilanne ei välttämättä näy kuvaajassa, koska lukema rekisteröityy minuutin sykleillä ja pahin tilanne ei kestänyt ajallisesti pitkään, kun testi jouduttiin keskeyttämään. Paine-eron maksimitilanteessa alkoi huoneilmaan tulla runsaasti tuhkapölyä tulipesän luukun välistä aiheuttaen voimakkaan savun hajun sisätiloissa. Tässä vaiheessa testi keskeytettiin ja tilat tuuletettiin. Häkämittari ei missään vaiheessa kuitenkaan ehtinyt reagoimaan häkäpitoisuuden nousuun, näyttäen koko testin 0 ppm:n pitoisuutta. Testitilanteessa ulkona oli noin -10 °C pakkasta.

### 5.3.11 Kyselytutkimus

Mittausjakson aikana tehtiin LVI-alan ammattilaisille suunnatussa sosiaalisen median ryhmässä kysely, missä pyydettiin vastauksia mikä käytännön työelämässä painesuhteiden ongelmassa on ollut pääasiallinen ongelmatilanteen aiheuttaja. Kyselyyn tuli yhteensä noin 150 vastausta. Vastausten jakauma on esitetty kaaviossa 1.

KAAVIO 1. Paine-erosta johtuvien ongelmatilanteiden syyt aihepiireittäin

#### Ongelmatilanteiden juurisyyt



## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta ja havaita, että huonosti toteutettu painesuhteiden hallinta ja erilaisten erillispoistojen, tulisijojen korvausilma ja ilmanvaihtojärjestelmä voi aiheuttaa paljon riskejä rakenteille ja jopa terveydellisesti ajateltuna. On tärkeää, että suunnittelussa on huomioitu rakennus kokonaisuutena kaikkine tekijöineen ja ominaisuuksineen.

Mittausten perusteella tulisija ei aiheuta merkittävää paine-eroa ilman korvausilman kunnollista toteutusta, mutta huono korvausilman toteutus vaikuttaa palamiseen merkittävästi. Huono palaminen ilmenee konkreettisesti esimerkiksi polttopuun lisäämisen yhteydessä, kun savua kulkeutuu sisäilmaan. Mittausten perusteella 110 mm:n palamisilmaputki takan alle johdettuna on riittävä korvausilman toteuttamisreitiksi kohtuullisella putkipituudella, eikä suurempi virtausaukko lisää palamisen nopeutta käytännössä merkittävästi, mutta pienentää hieman paine-eroa. Vaikka tulisijan korvausilma johdettiin huonetilan läpi kattoventtiilin kautta, ei huoneilman lämpötilassa tapahtunut merkittävää laskua. 160 mm:n korvausilmaventtiilillä toteutettuna paine-ero oli hieman pienempi kuin 110 mm:n korvausilmaputkella, mutta yhtäaikainen korvausilmareittien käyttö ei enää pienentänyt paine-eroa.

Ulkoilman alhainen lämpötila selvästi aiheuttaa ongelmia jopa lyhyessä ajassa. Ilmanvaihtokoneeseen kertyvä jää ja raitisilmasäleikköön kertynyt kuura muuttaa nopeasti olosuhteita, eikä näihin ole kovin helppo vaikuttaa ennakoivasti. Sulanapitoasetuksilla ja ulkoilmasäleikköä seuraamalla voidaan jonkin verran ennakoida näitä tilanteita. Pakkanen on yksi niistä tekijöistä, joiden ennakointi vaatii myös asukkaalta aiheen tuntemusta. Raitisilmasäleikköön jätetty hyttysverkko kasvat-  
taa merkittävästi ongelmatilanteiden mahdollisuuksia, verkko tulisikin aina poistaa jo asennusvaiheessa. Pakkanen voi aiheuttaa rakennukseen yli- tai alipainetta, riippuen esimerkiksi mihin osaan järjestelmää jäätä kertyy. Rakentamisessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota rakennuksen vaipan yläosien tiiveyteen, koska suurin ylipaine muodostuu näihin osiin rakennusta, etenkin kovilla pakkasilla.

Liesituulettimen aiheuttamat ongelmat nousivat selkeänä tekijänä kyselytutkimuksessa esille, myös mittauksissa tämä pystyttiin havaitsemaan. Liesituuletin aiheuttaa merkittävän alipaineen rakennukseen, kun korvausilmaa ei ole toteutettu riittävästi. Huono korvausilma myös rajoittaa erillispois-

ton läpi kulkevaa ilmavirtaa ja kasvattaa sisäilman alipainetta jopa haitalliselle tasolle. Ilmanvaihtokoneen kautta toteutettu kompensointi on riittävä, mutta kova pakkanen voi aiheuttaa koneen lämmöntalteenoton tai kammioiden jäätymistä. 160 mm:n korvausilmaventtiili riittää tehokkaan liesipoiston korvausilmareitiksi mittausten perusteella. Paras lopputulos saavutettiin korvausilmaventtiiliin ja tuloilman kompensoinnin yhdistämisellä. Tällä toteutuksella on huomioitava esimerkiksi keskuspölynimurin kompensointiasetus, mikäli samat puhallinasetukset ohjaavat molempia toimintoja, mitoitus tulee tehdä pienemmän poistoilmavirran mukaan, ettei rakennukseen synny haitallista ylipainetta. Kompensoinnin asetus voi aiheuttaa rakennukseen hetkittäistä ylipainetta, kun liesituuletinta pidetään pienellä teholla ja mitoitus on tehty suuremmalle teholle.

Mittausten perusteella suhteellisen pienellä ilmanvuodolla on vaikutusta rakennuksen paine-eron suuruuteen. Varsinkin korkeammassa rakennuksessa vuotoilmapaikkojen määrää pitäisi pyrkiä minimoimaan ja esimerkiksi painovoimaisia venttiileitä välttää, koska termisen paine-eron vaikutus rakennuksen yläosissa voi muodostaa helposti ylipainetta. Alipaineen lisääminen poistoilman kasvattamisella ilmanvaihdon kautta taas lisää hallitsematonta vuotoilmamäärää ja energiankulutusta, mikä ei ole tavoiteltavaa.

Ilmanvaihdon säätäminen kerroksittain ei käytännössä näy rakennuksen alipaineissa samassa suhteessa kerrosten välillä. Tärkeintä ilmanvaihdon säädössä on kokonaisilmavirtojen suhde ja alakerrassa voi olla jopa selvästi suurempi tuloilmavirta, siten ettei se näy haitallisesti paine-eron muutoksissa kummankaan kerroksen osalta. Yläkerrasta korostetusti suurempi poistoilmavirta näkyy samassa suhteessa myös alakerran paine-eron kasvuna. Mittausdatan perusteella paine-ero heittelee tuulen vaikutuksesta todella paljon ja tyyniä ilmanvaihdon säätötyölle soveltuvia päiviä oli verrattain vähän. Kunnollinen säätö vaatisi pitempiaikaisen mittauksen ja säätötyössä tulisi huomioida kompensointi- ja yhteiskäyttötilanteet. Tämä ei käytännössä toteudu, kun murto-osassa todellisista rakennushankkeista.

Asumisen alipainetta aiheuttavien toimintojen yhtäaikainen käyttö voi olla jopa turvallisuusriski, kun tulisijaa käytetään. Tulisijojä on käytetty Suomessa pitkään ja niiden käyttö osataan yleisesti hyvin ja riskit tunnistetaan helposti esimerkiksi savun hajun perusteella, osaltaan tämän vuoksi häikä ei ole aiheuttanut esimerkiksi häikäkuolemia tekniikan kehittymisen ja rakennusten rakenteiden muutosten murroksissa viime vuosikymmeninä. Tulisijan korvausilman riittävää toteutusta ei voi kuitenkaan väheksyä ja se tulee aina suunnitella ja toteuttaa huolella, vaikka huonosti toteutettu korvausilma ei aiheuttaisikaan haitallista alipainetta ilman muita tekijöitä.

Keskuspölynimurin aiheuttama alipaine ilman korvausilman toteutusta aiheutti yllättävän suuren alipaineen. Kompensoinnin toteutus esimerkiksi tuloilman lisäämisellä toimi erittäin hyvin, eikä oikealla säädöllä paine-erotrendistä pysty erottamaan sen käyttöä. Keskuspölynimurin korvausilman toteutuksessa toimi myös korvausilmaventtiili riittävästi.

Tuuli on paine-erolla mitattuna ylivoimainen vaikuttaja, eikä siihen pysty käyttäjä vaikuttamaan enää asumisen aikana. Tuulen aiheuttaman paineen ongelmat voivat korostua, jos rakennuksessa on paljon ilmapuotoja. Tuulen painevaikutus oli myös yksittäisenä tekijänä merkittävästi suurin ja ajalliselta kestoaltaan selkeästi merkittävin tekijä.

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien vakiopainesäätö toimii yllättävän hyvin. Mittausten perusteella merkittävää etua esimerkiksi tuulen suunnan muuttuessa pienillä tuulennopeuksilla vakiopainesäätö ei tuo, mutta haittatekijöitäkään ei havaittu. Järjestelmän paine-eron muutoksiin kanavistossa säätö toimi hyvin ja suodattimien tukkeutumisen vakiopainesäätö huomio todella hyvin. Pakkastilanteen muutoksia ei käytännössä päästy kokeilemaan, mutta näissäkkin tilanteissa vakiopainesäätö korjaisi vastaavalla tavalla poikkeavia tilanteita, esimerkiksi ulkoilmasäleikön tukkeutumisen tai kammioon kertyneen jään aiheuttamat painehäviövaikutukset. Yksittäisen nostona vakiopainesäätö toimi yllättävän tarkasti ja toimi tarkoituksenmukaisesti.

## 7 POHDINTA

Rakennuksen paine-eron hallintaan vaikuttaa moni ulkoinen tekijä ja aihe suhteellisen laaja kokonaisuus. Aihe on ajankohtainen muuttuvassa ja kehittyvässä rakentamisympäristössä ja aiheen tutkiminen oli mielenkiintoista. Työssä haluttiin selvittää erilaisten sisä- ja ulkoilman välisen paine-eronratkaisujen toimivuutta asuntorakentamisessa sekä selvittää erilaisten ratkaisujen epäkohtia ja huomioita. Näihin kysymyksiin onnistuttiin vastaamaan kohtuullisen hyvin, vaikkakin tarkempi aihekohtainen perehtyminen olisi vaatinut laajemman tutkimuskokonaisuuden. Työn toteutuksen aikana aihetta tiivistettiin ja tutkimustilanteita tarkennettiin olosuhteiden mukaan. Työn laajuus mittauskohteiden osalta supistui aiottua pienemmäksi käytännön syistä, koska työn koko haluttiin pitää tarkoituksenmukaisena. Voidaan kuitenkin todeta, että aiheesta olisi vielä tarpeen tehdä yksityiskohtaisempia tutkimuksia yksittäisistä tapauksista, mutta niiden sisällyttäminen tähän työhön ei ollut järkevää. Rakenteellisesti, kooltaan ja ilmanvaihtojärjestelmältään erilaisten rakennusten yhdistäminen samaan työhön olisi kasvattanut työn laajuuden kohtuuttoman isoksi.

Työn edistäminen normaalin asumisen ohella oli mielenkiintoista ja paljon erilaisia tilanteita tutkittiin ja simuloitiin, vaikka näitä kaikkia ei lopulliseen työhön kirjattukaan. Työhön pyrittiin saamaan tarkoituksenmukaisimmat ja mielenkiintoisimmat havainnot ja tilanteen. Itse projekti oli myös työn laajalle oppimisprojekti, jonka myötä sai paljon uutta näkökulmaa ja paine-erojen hallintaan ja ongelmiin. Mittauksia tehdessä sai kattavan kuvan erilaisista tilanteista ja läheltä itse seuraten oli helpompaa simuloida myös tarkoituksellisesti erilaisia tilanteita. Monelle mittausdatan poikkeavuudelle oli helpompaa selvittää syy, kun asukkaan aiheuttamat tekijät kulloisessakin tilanteessa oli tiedossa. Mittausten ja tutkimustyön perusteella työn tulokset tukevat jo olemassa olevaa tutkimustietoa aiheesta, ottaen huomioon tämänhetkiset vallitsevat ratkaisut sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron hallintaan. Rakentaminen on jatkuvassa murroksessa ja aihetta on hyvä tarkastella samanaikaisesti dynaamisesti erilaisten teknisten ratkaisujen kehittyessä.

Mittausjakson aikana talven sää oli poikkeuksellisen lämmin ja kohtalaisen tuulinen, mutta varsinaisia myrskylukemia mitattiin virallisen mittausdatan perusteella ennätyskellisen vähän, vähemmän kuin kertaakaan vuoden 2006 jälkeen (43). Mittausjakso oli noin 3 kuukauden mittainen ja sen aikana tarkasteltavaksi pyrittiin poimimaan mielenkiintoisimmat tilanteet. Pitempiä kylmiä pakkasjaksoja ei mittausjaksolle kertynyt muutamaa yksittäistä pakkaspäivää lukuun ottamatta, joten kylmien olosuhteiden osalta tutkimus ei ollut otannaltaan kovin kattava. Jatkuvalla mittauksella saatiin

kuitenkin kohtuullisen kattava otanta nimenomaan normaalista asumisesta ja olosuhteiden muutoksista ja niiden vaikutuksista.

Työ olikin antoisa ja aihe todella mielenkiintoinen ja aiheesta jäi paljon kysymyksiä vielä auki. Kiitokset työn toteuttamisen mahdollistamisesta kuuluu ohjaavalle opettajalle, työnantajalle ja oppilaitokselle. Työn edistäminen työn ohella oli kaikkien näiden tekijöiden mahdollistama joustavuudellaan ja kannustavalla suhtautumisella.

## LÄHTEET

1. Rakennusteollisuus RT ry 2022. Asuntomarkkinat, asuntotuotanto. Hakupäivä 8.11.2022. <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/Kuviopankki/Asuntomarkkinat/>.
2. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Hakupäivä 11.11.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>.
3. Kuuluvainen, Leino, Lindberg, Ben-Roger, Lylykangas, Kimmo, Mikkola, Juulia, Sainio, Jukka & Vuolle, Mika 2018. Painovoimainen ilmanvaihto opas. Helsinki: Ympäristöministeriö.
4. Ympäristöministeriö 2018. Ääniympäristö, Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Hakupäivä 22.10.2022 [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E\\_DA43\\_4DCA\\_9CEE\\_47DBB9EFCB08-138568.pdf](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf).
5. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Hakupäivä 11.11.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>.
6. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015. Hakupäivä 11.11.2022 <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.
7. Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Hakupäivä 11.11.2022. <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>.
8. Avikainen, Jesse 2022. Segmenttivastaava. Heatco Finland Oy. Puhelinkeskustelu 6.8.2022.
9. Tilastokeskus 2021. Asunnot talotyyppin, käytössäolon ja rakennusvuoden mukaan 2021. Hakupäivä 10.10.2022. [https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_asas/statfin\\_asas\\_pxt\\_116f.px/chart/chartViewColumn/](https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_asas/statfin_asas_pxt_116f.px/chart/chartViewColumn/).

10. Tilastokeskus 2021. Asumisen energiankulutus, 2008-2020. Hakupäivä 10.10.2022. [https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_asen/stat-fin\\_asen\\_pxt\\_11zs.px/chart/chartViewColumn/](https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_asen/stat-fin_asen_pxt_11zs.px/chart/chartViewColumn/).
11. Motiva 2022. Ilmanvaihdon eri toteutustavat. Hakupäivä 22.10.2022. [https://www.motiva.fi/koti\\_ ja\\_ asuminen/taloyhtiöt\\_ -\\_ yhdessä\\_ energiatehokkaasti/ilmanvaihto/ilmanvaihdon\\_ eri\\_ toteutustavat\\_](https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/taloyhtiöt_ -_ yhdessä_ energiatehokkaasti/ilmanvaihto/ilmanvaihdon_ eri_ toteutustavat_).
- 12 Fläktgoup Oy 2022. Asuntoilmanvaihdon ratkaisuja. Hakupäivä 22.10.2022 <https://www.flaktgroup.com/fi/ratkaisut/asuntoilmanvaihto/asuntoilmanvaihdon-ratkaisuja/keskittetty-ilmanvaihto/>.
13. Nyman, Mikko 2000. Lämmitysjärjestelmien oikea käyttö ja kunnossapito. Saarijärvi: Gummerus.
14. Markkanen, Raimo 1980. Ilmalämmitys. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.
15. LVI-Nero Oy 2022. Ilmalämmityslaitte toimintaperiaate. Hakupäivä 22.10.2022. <https://vinero.fi/tuotteet/ilmalammityslaitteet/parmaid/>.
16. Ympäristöministeriön asetus eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista 718/2020. Hakupäivä 11.11.2022. [https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200718\\_](https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200718_).
17. Hengitysliitto. Ilmanvaihtojärjestelmät. Hakupäivä 22.10.2022. <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat/>.
18. Talotekniikkateollisuus 2021. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. Hakupäivä 22.10.2022. [https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas\\_](https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas_).
19. Tiivi Oy. Klik-raitisilmaventtiili. Hakupäivä 22.10.2022. <https://www.tiivi.fi/klik-raitisilmaventtiili/> .

20. Tom Allen Senera Oy. Poistoilman lämmöntalteenotto -opas. Hakupäivä 22.10.2022. <https://www.tomallensenera.fi/lataa-poistoilman-lammon-talteenotto-opas?hsC-taTracking=e88919b4-eb5f-49f7-9de7-422574de4a1c%7Cf0e9814b-4c64-4202-8936-b9aba1885558>.
21. Oilon Oy. Kerrostalon poistoilman lämmöntalteenotto. Hakupäivä 22.10.2022. <http://oilon.wpdemo.emedia.fi/products/kerrostalon-poistoilman-lammontalteenotto/>.
22. Böök, Netta, Mikkola, Juulia, Kuuluvainen, Leino 2022. Ilmakirja. Painovoimainen ilmanvaihto. Helsinki: Otava.
23. TM Rakennusmaailma 2020. Tiilirunkoiset kerrostalot ja painovoimainen ilmanvaihto tulivat takaisin. Hakupäivä 22.10.2022. <https://rakennusmaailma.fi/tiilirunkoiset-kerrostalot-ja-painovoimainen-ilmanvaihto-tulivat-takaisin/>.
24. Sosiaali- ja terveysministeriö 2003. Asumisterveysohje. Helsinki: Edita Prima Oy.
26. Seppänen, Olli 2008. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Anjalankoski: Solver palvelut Oy.
27. Sisäilmayhdistys ry 2008. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Hakupäivä 30.10.2022. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>.
28. Finvac ry 2019. Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen. Hakupäivä 30.10.2022 [https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/opas\\_asuinrakennusten\\_ilmanvaihdon\\_mitoitukseen\\_2019.pdf](https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/opas_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_mitoitukseen_2019.pdf).
29. Lastovets, Natalia 2020. Kurssiluentomateriaali. TT00CR21-3001. Lämpötilan vaikutus rakennuksen paine-eroihin. Oulun ammattikorkeakoulu.
30. Tulikivi Oy. Paloilma suunnittelu ja asennus. Hakupäivä 3.11.2022. <https://blog.tulikivi.fi/blogit/paloilman-johtaminen-takkaan-tulisi-huomioida-jo-suunnitteluvaiheessa>.

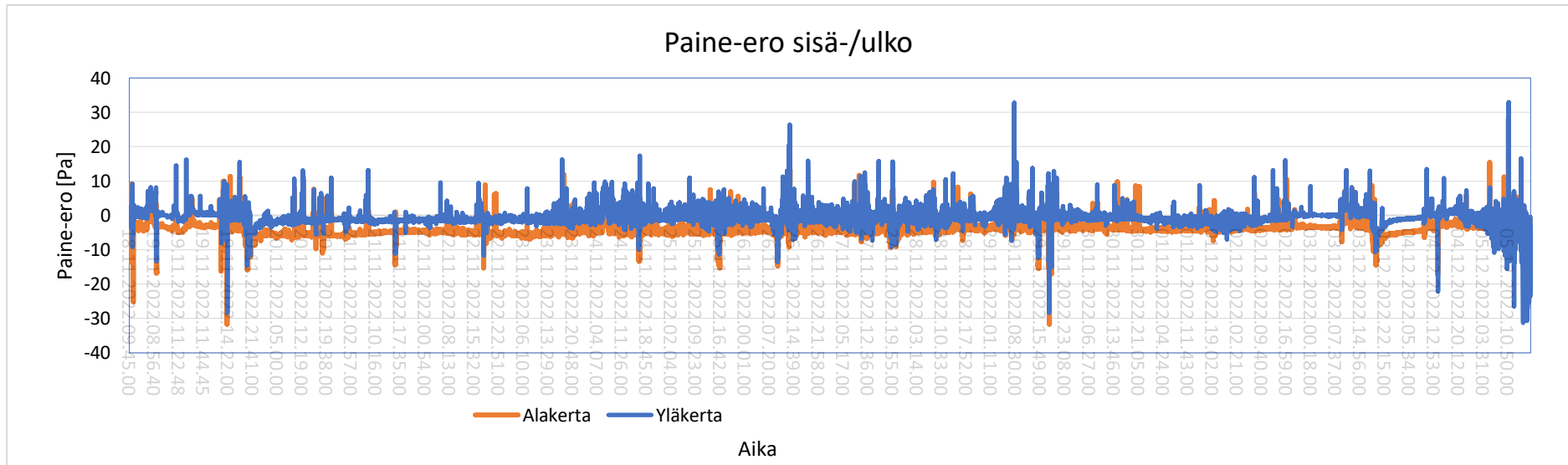
30. Heatco Finland Oy. Tuotteet. Myyntiesite. Hakupäivä 3.11.2022. <https://www.heatco.fi/tuotteet>.
32. Vilpe Oy. Korvausilmaventtiilisarja. Hakupäivä 3.11.2022. <https://www.vilpe.com/fi/product/wive-100-korvausilmaventtiilisarja-termos/>.
33. Lindab Oy. Tuotetiedot. Hakupäivä 4.11.2022. <https://www.lindab.fi/Tuotteet/ilmanvaihto/kanavajajestelmat/pyorea-kanavajajestelma/sulku--ja-saatopellit/dtbu/?sort=popularity&disp-lay=16&page=1>.
34. Schiedel Oy. Tuotetiedot. Hakupäivä 4.11.2022. <https://www.schiedel.com/fi/valmispiiput/harkkopiiput/rondo-air/>.
35. Siren, Kai 1995. Ilmastointitekniiikan mittaukset. Espoo: Tietonova Oy.
36. A-Insinöörit Oy 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohje. Hakupäivä 4.11.2022. <https://talotekniikkainfo.fi/esimerkit/rakennusten-paine-erojen-mittausohje-loppuraportti>.
37. Kuurola, Pentti 2015. Ilmanvaihtolaitteiston aiheuttama paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Diplomityö. Tampereen Teknillinen yliopisto. Trepo-tietokanta.
38. Ympäristöministeriö 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma D2, Helsinki.
39. Vertia Oy. Ilmanvuotoluku. Hakupäivä 4.11.2022. <https://vertia.fi/tiiveysmittaus/ilmanvuotoluku/>.
40. Maaseudun tulevaisuus 2021. Häkäkuolemat ovat vähentyneet Suomessa. Hakupäivä 6.11.2022. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/uutiset/41986868-dea7-5ed9-9f0d-8648e98f8657>.
41. Sisäilmayhdistys ry 2008. Mikrobikasvun edellytykset. Hakupäivä 19.11.2022. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Mikrobit/Mikrobikasvun-edellytykset>.

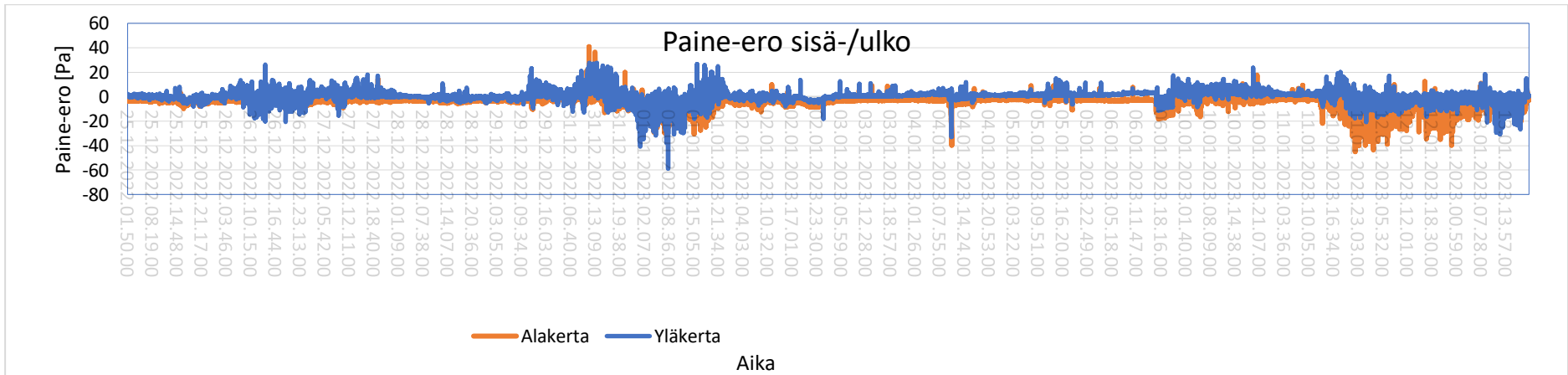
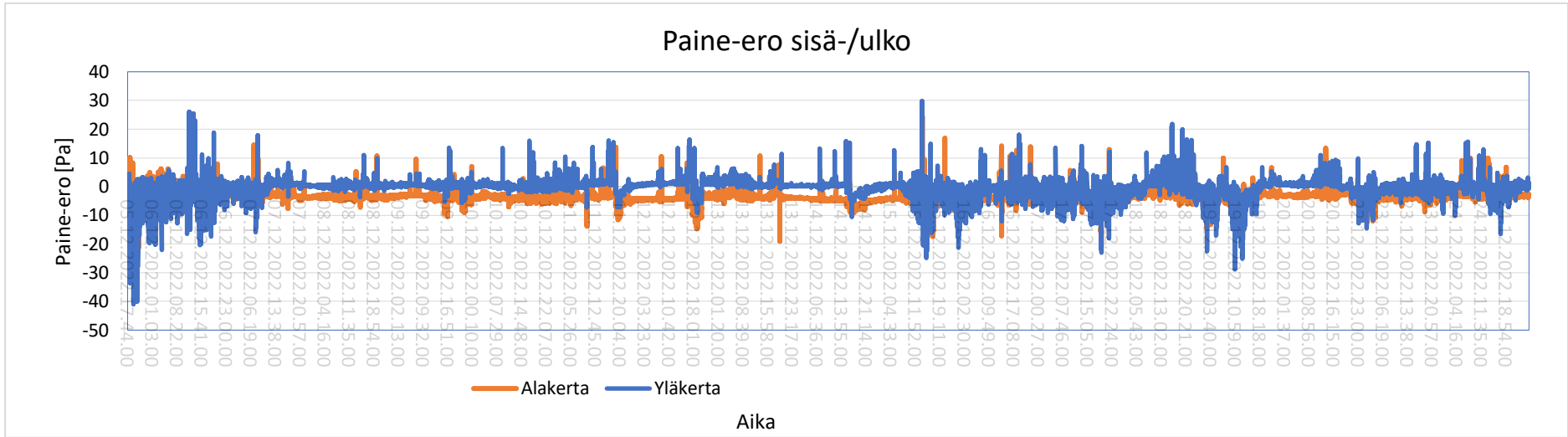
42. Kriikku, Pirkko & Ojanperä, Ilkka 2020. Helsingin yliopisto. Lääkärilehti 2020. 3/2020 75 s. 126 – 134. Alkuperäistutkimus. Hakupäivä 19.11.2022. <https://www.laakarilehti.fi/tieteessa/alkuperais-tutkimukset/alkoholimyrytyskuolemat-ovat-vahentyneet-huumekuolemat-eivat/>.
43. Ouman Oy. Langaton mittausjärjestelmä Ouman Wireless. Hakupäivä 24.2.2023. <https://ouman.fi/tuote/langaton-mittausjarjestelma-ouman-wireless/>.
44. Ilmatieteenlaitos. Tuulitilastot. Hakupäivä 24.2.2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot>.
45. Siikanen, Unto. 2014. Rakennusfysiikka Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.

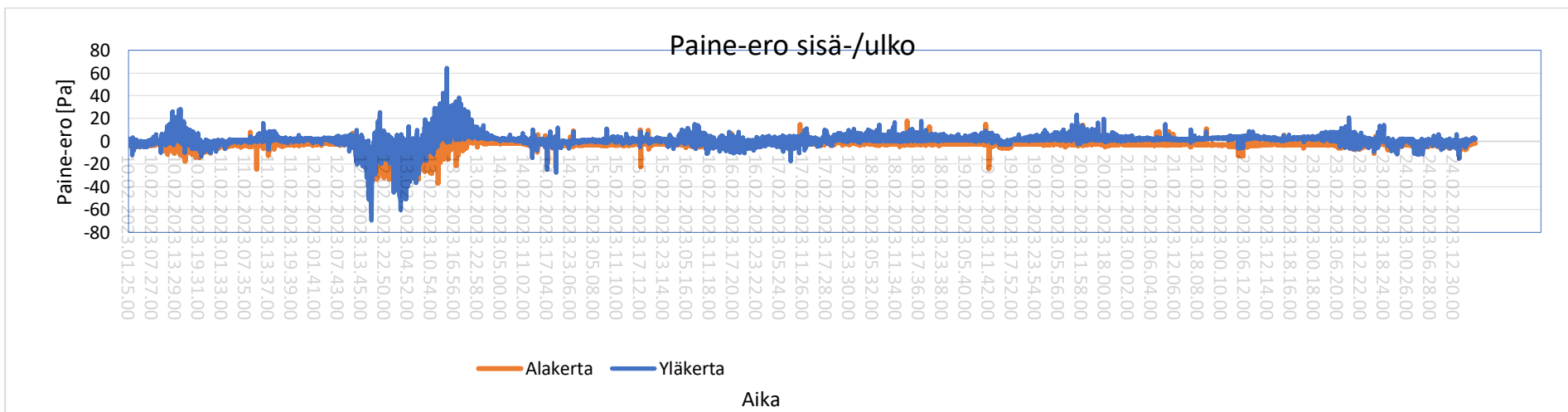
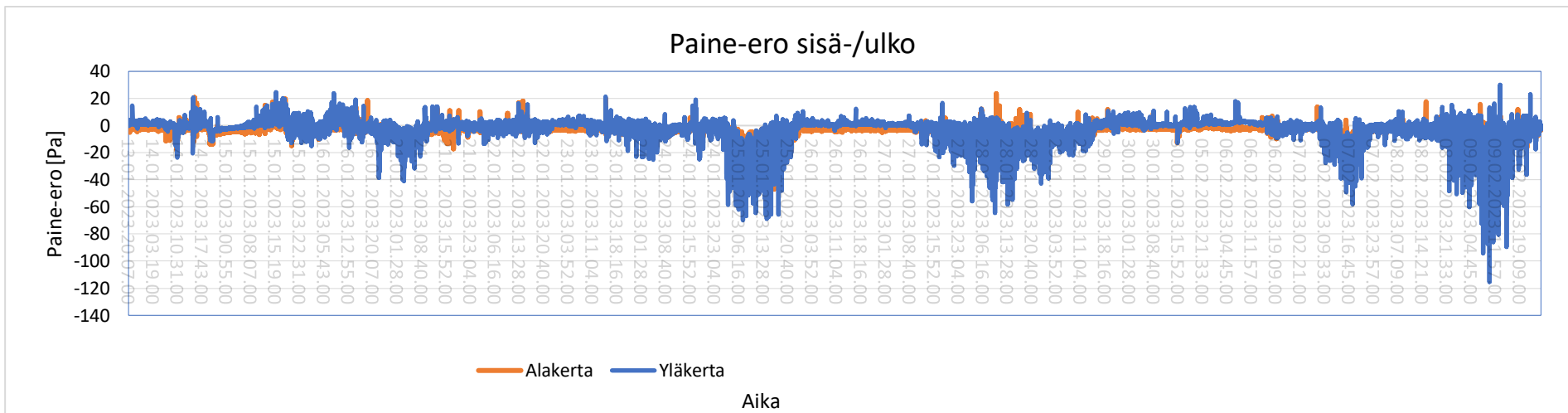
# PAINE-EROKUVAAJAT KOKO MITTAUSJAKSOLTA

LIITE 1

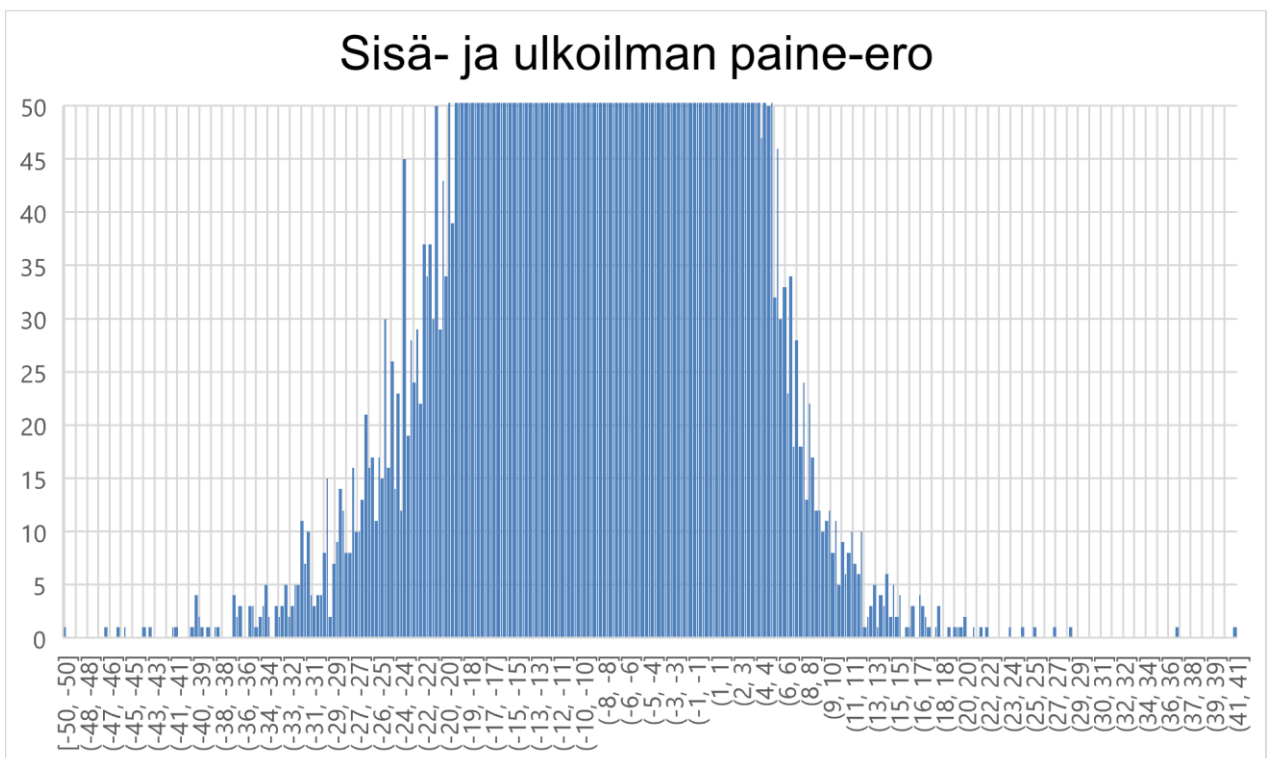
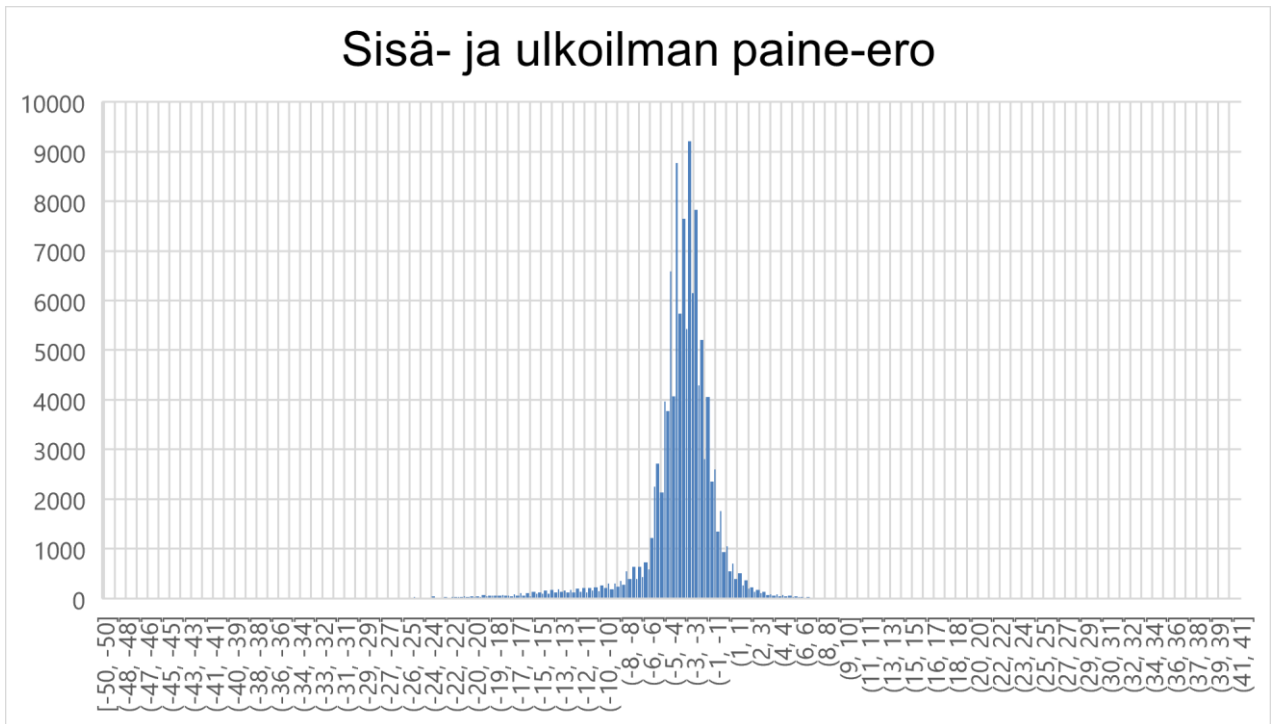
Jokaisessa kuvaajassa noin 25 000 mittausta 17 vuorokauden aikajaksolta. Koko mittausjaksolla yhteensä 122 000 mittausta. Kuvaajat aikajärjestyksessä.







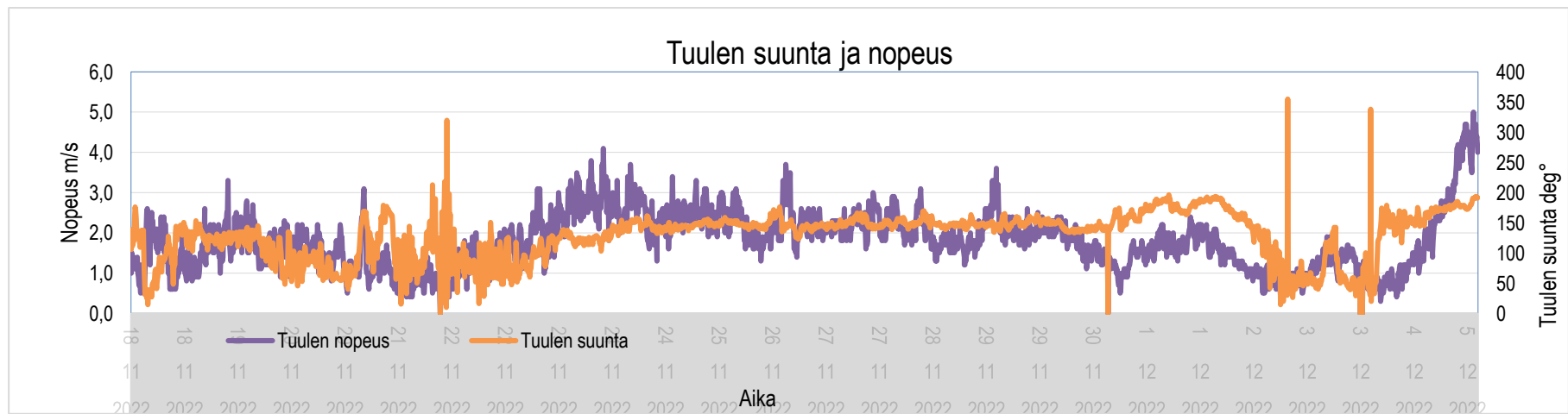
Koko mittausjakson mittauslukemat sisä- ja ulkoilman välisestä paineesta histogrammina. Mittauksia yhteensä noin 122 000 kappaletta. Palkin korkeus ilmoittaa mittauslukemien kappalemäärät ja x-akseli paine-erolukeman [Pa].

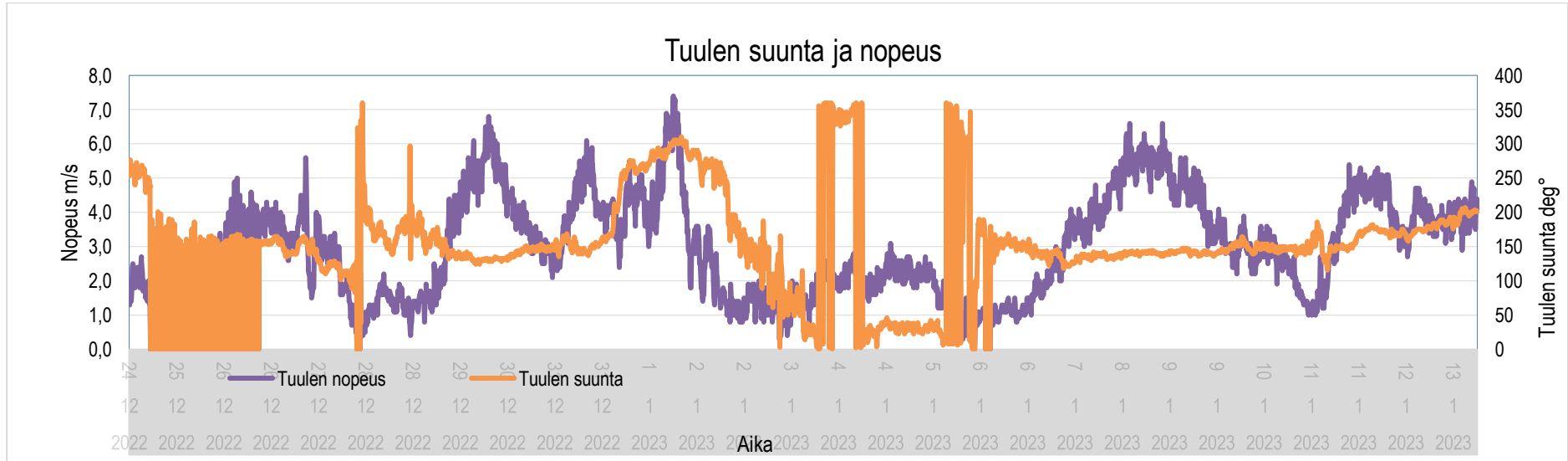
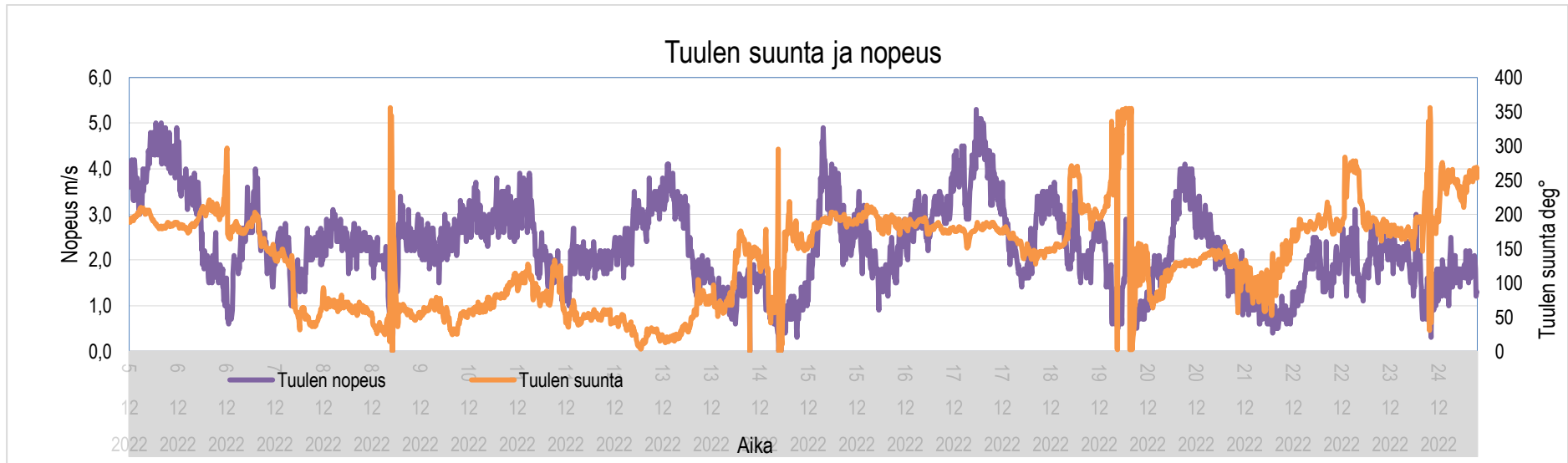


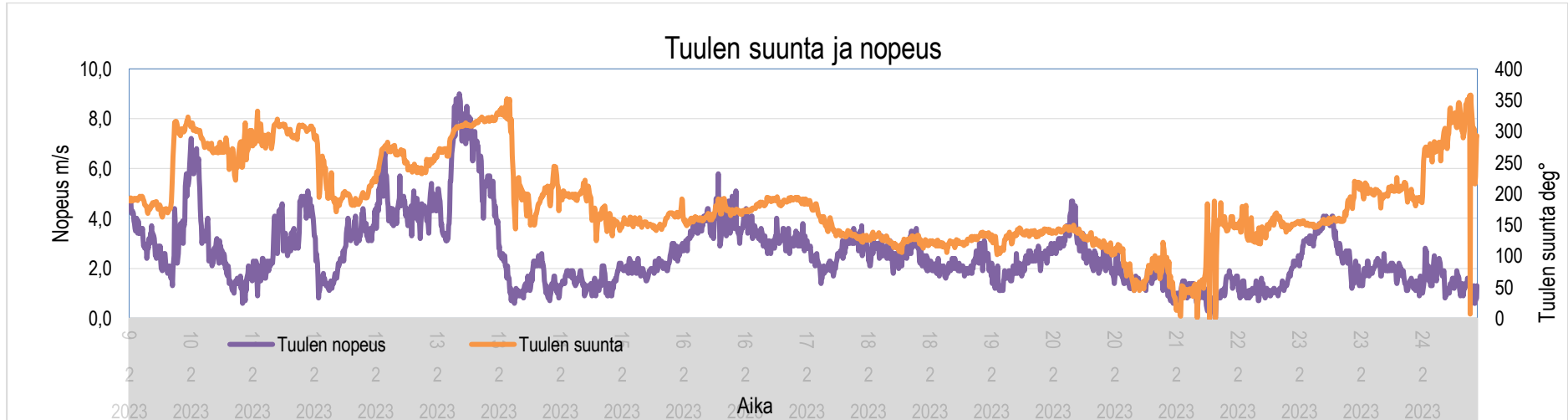
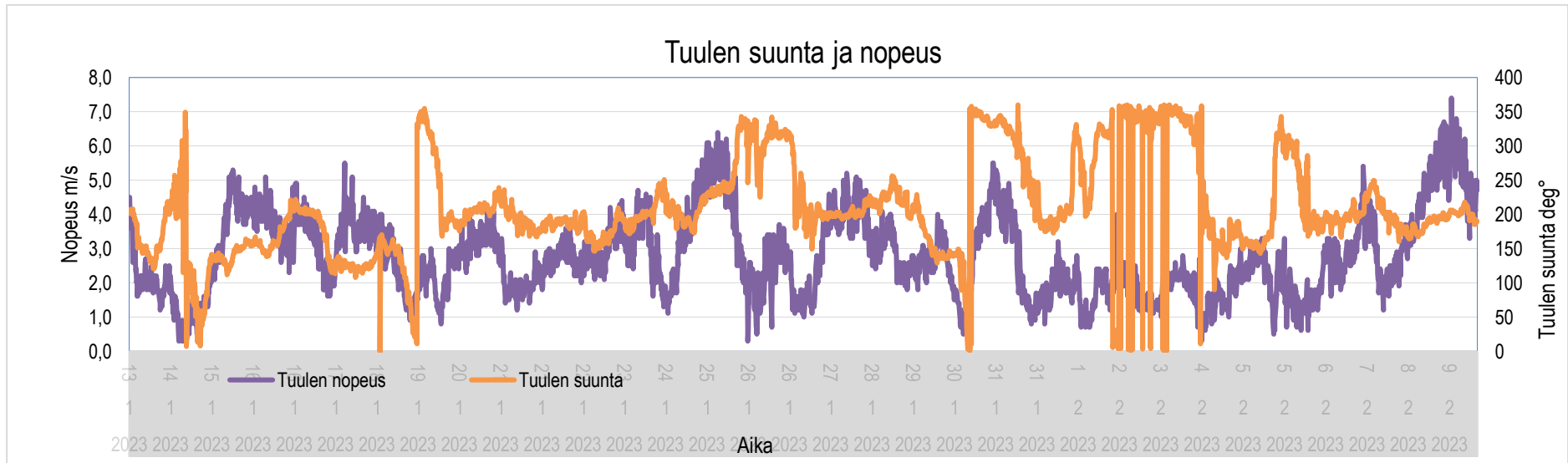
## MITTAUSJAKSON TUULITIEDOT

LIITE 3

Jokaisessa kuvaajassa noin 2 800 mittausta noin 17 vuorokauden aikajaksolta. Koko mittausjaksolla yhteensä 14 200 mittausta. Kuvaajat aikajärjestyksessä. Kuvaajat vastaavalta ajalta ja vastaavassa järjestyksessä, kun paine-erokuvaajat.







Koko mittausjakson mittauslukemat tuulen nopeudesta (ei puuska) histogrammina. Mittauksia yhteensä noin 14 200 kappaletta. Palkin korkeus ilmoittaa mittauslukemien kappalemäärät ja x-akseli tuulen nopeuden arvon [m/s].

