



Hormivaikutuksen tarkastelu ilmanvaihdon näkökulmasta

Timo Sulkala

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2020

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-tekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-tekniikka

Sulkala, Timo
Hormivaikutuksen tarkastelu ilmanvaihdon näkökulmasta

Opinnäytetyö 45 sivua
Huhtikuu 2020

Hormivaikutus, toiselta nimeltään savupiippuvaikutus on sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta johtuva ilmiö, jonka takia rakennukseen aiheutuu painesuhteiden muutoksia. Luonnollinen konvektio saa aikaan ilman liikettä johtuen sen tiheyseroista. Ulkoilman ollessa sisäilmaa kylmempää rakennuksen alaosaan muodostuu alipainetta ja yläosaan ylipainetta. Liiallinen ali- tai ylipaine voivat aiheuttaa muun muassa sisäilmaongelmia, rakenteiden kosteusvaurioita, energiahukkaa, ilmanvaihdon toiminnan muutoksia, vedon tunnetta ja paineesta johtuvaa ovien avaamisen vaikeutta. Mitä korkeampi rakennus on, sen alttiimpi se on hormivaikutukselle.

Työn tavoitteena oli selvittää hormivaikutusta liittyen koneelliseen ilmanvaihtoon. Selvitystä tehtiin kirjallisuudesta ja verkkolähteistä, minkä lisäksi järjestettiin käytännön mittauksia sekä simuloitiin erilaisia olosuhteita, joissa tarkasteltiin hormivaikutusta ja ilmanvaihtoa. Tutkittiin sekä hormivaikutuksen näkymistä ilmanvaihdossa että painesuhteiden hallintaa ilmanvaihdolla.

Aiemmissä hormivaikutukseen liittyvissä tutkimuksissa on todistettu, että rakenteelliset ja arkkitehtuuriset ratkaisut ovat tehokkaimpia hormivaikutuksen taltuttamiseen. Aina ne eivät ole mahdollisia, etenkin saneerauskohteissa tekniset ratkaisut saattavat olla helpompi vaihtoehto toteuttamisen kannalta.

Tutkimuksen mittausten tuloksena todetaan, että kuusikerroksisen rakennuksen ilmanvaihdossa ei välttämättä tapahdu suuria muutoksia ilmanvaihdon toiminnassa hormivaikutuksen aiheuttamana. Tilanne on toinen korkeampien rakennusten kohdalla, suunnitteluoppaiden mukaan se tulisi huomioida kun päätelaitteiden korkeusero on 11 metriä. Simuloinneilla todistetaan, kuinka rakennuksen suunnittelu- tai rakennusvirhe voi lisätä haitallista hormivaikutusta.

Asiasanat: hormivaikutus, savupiippuvaikutus, ilmanvaihto, painesuhteet, paineero

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Building Services Engineering

TIMO SULKALA:
Stack effect and ventilation

Bachelor's thesis 45 pages
April 2020

This thesis examines stack effect and its impact on ventilation. Stack effect via ventilation are also studied and explained. Stack effect is a phenomenon that emerges in a building when there is a great temperature difference between the indoor and outdoor air. Natural convection of the air causes it to flow in from the bottom and create excess pressure on the top floors of a building when the outdoor air is colder than indoor air. The issue is more prominent in tall buildings and it can cause loss of energy, drought, health issues and water damage risks, to name a few. The aim of the study was to clarify the relation between stack effect and mechanical ventilation.

This topic was studied from literature and multiple online resources. Pressure difference measurements were taken to understand the practical standpoint on the issue. Finally, simulation software IDA ICE was used to simulate the stack effect of various conditions.

Previous studies have proven that best ways to mitigate stack effect are by handling it with structural and architectural solutions. The result of the thesis shows that technical solutions are a viable option, for example manipulating ventilation.

Taken measurements note that a six-storey buildings ventilation is likely not effected by the stack effect in harmful proportions. Various causes may affect the results. The effect does cause harm in taller buildings, and it should be considered when the ventilation systems height difference exceeds 11 meters, according to other design guides. Simulations prove that an error in designing or building an edifice could escalate the stack effect easily.

Key words: stack effect, chimney effect, ventilation, pressure difference, air infiltration

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	Tausta	6
2	TEORIA – RAKENNUKSEN PAINESUHTEET	8
2.1	Lämpötilaeron aiheuttama termien paine-ero eli hormivaikutus ...	9
2.1.1	Hormivaikutus suljetussa tilassa	12
2.2	Ilmanvaihto	13
2.3	Tuuli	16
2.4	Hormivaikutuksesta aiheutuvat ongelmat	17
3	SUUNNITTELURATKAISUT PAINESUHTEIDEN HALLINTAAN	19
4	MITTAUKSET	21
4.1	Kohde	21
4.2	Paine-eromittaukset	22
4.3	Ulkoilman olosuhdemittaukset	24
4.4	Mittaukset käytännössä	26
4.5	Mittaustulokset	30
4.5.1	Tuulen vaikutus ilmanvaihtoon	31
4.5.2	Termisen paine-eron vaikutus ilmanvaihtoon	35
5	SIMULOINNIT	37
6	POHDINTA	42
	LÄHTEET	44

1 JOHDANTO

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta toteaa ilmanvaihtoon liittyen avaussanoinaan että ”Ilmanvaihdon on toteuttava terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa” (Ympäristöministeriön asetus... 2017, 4), mistä voidaan siis päätellä sisäilman laadun ja terveellisyyden olevan tärkeimmässä asemassa mitä tulee ilmanvaihdon suunnitteluun.

Sisäilman laadun ajankohtaisuus sekä painesuhteisiin ja sen aiheuttamiin ongelmiin liittyvät kokemukset niin itselläni kuin lähipiirissäni innoittivat valitsemaan aiheeksi hormivaikutuksen tutkimisen ilmanvaihdon näkökulmasta. Työ keskittyy koneelliseen ilmanvaihtoon, ei niinkään painovoimaiseen ilmanvaihtoon, jonka toiminta puolestaan vaatii hormivaikutuksen ilmenemistä toimiakseen.

Hormivaikutus on ulko- ja sisäilman lämpötilaeroista johtuva ilmiö, joka saa aikaan paine-eroa ulko- ja sisäilman välille (Simmonds 2015, 39). Paine-ero ja rakennuksen ilmatiiveys vaikuttavat rakennuksen ilmavirtauksiin. Ilma virtaa aina ylipaineesta alipaineeseen (Sisäilmayhdistys – ilmavirtaukset rakennuksessa 2008).

Suurten paine-erojen syntyminen aikaansaa ongelmia rakennuksen rakenteiden ja käytettävyyden kannalta sekä sisäilman terveellisyyttä ajatellen. Tyypillinen tapaus ongelmatilanteiden syntyyn on nähtävissä rakennuksissa, joissa ilmanvaihtojärjestelmänä on koneellinen poistoilmanvaihto ja korvausilman järjestämistä ei ole hoidettu asianmukaisesti. Näissä tapauksissa merkittävä osa korvausilmasta saattaa imeytyä rakenteiden läpi ja tuoda mukanaan sisäilmalle haitallisia aineita seinärakenteista tai maaperästä alapohjan läpi. (Sisäilmayhdistys - ilmavirtaukset rakennuksessa 2008.)

Toisaalta taas liiallinen ylipaine aiheuttaa kosteusvaurioriskin kostean ilman virratessa sisältä ulos rakenteiden läpi. Sisäilman kosteus siirtyy ilmavirtausten mukana eli niin sanotusti kosteuskonvektiolla ja tiivistyy rakenteiden kylmiin

osiin tilanteessa, jossa rakennus on ylipaineinen kylmään ulkoilmaan nähden. Virtaus tapahtuu rakenteiden ilmaa läpäisevien materiaalien ja epätiivien kohtien läpi. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi elementtien väliset saumat, ikkunoiden ja ovien saumat, läpiviennit sekä ilmasulun vaurioituneet kohdat. (Sisäilmäyhdistys - ulkoseinät 2008.)

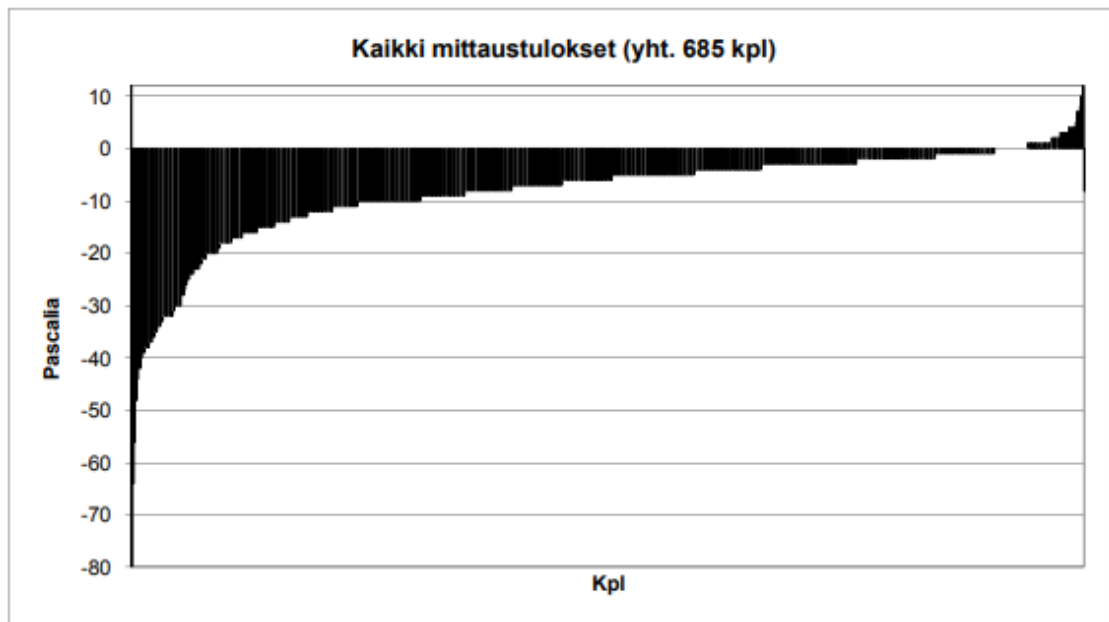
Kumpikin edellä mainituista tapauksista voimistuu paine-eron kasvaessa, jota muun muassa hormivaikutus lisää. Sen takia rakennusten painesuhteiden tunnistaminen ja hallinta on tärkeässä asemassa rakennuksen ja sen käyttäjien terveyllisyyden ja turvallisuuden kannalta.

1.1 Tausta

Paine-suhteisiin on kiinnitetty huomiota enenevässä määrin ajan kuluessa. Rakenteiden kostumista aiheuttavaan ylipaineeseen on kiinnitetty huomiota 70- ja 80-luvuilla. Ongelmaa pyrittiin ehkäisemään ilmanvaihtojärjestelmällä luodun alipaineen avulla. RT-korttien ohjeistus oli mittaamaan tuloilmavirrat 25-35% pienemmiksi, jotta alipaine saavutettaisiin ylimmässäkin kerroksessa. Seurauksena oli huomattava alipaine rakennuksen alaosassa. (Björkroth & Eskola 2019, 11.)

Alipaineeseen alettiin kiinnittää huomiota 90-luvulla, jolloin sisään suuntautuvia virtauksia alettiin ehkäistä tiiviimmillä ulkovaipoilla. Tavoitteena oli vähentää energiankulutusta ja sisään virtaavia haitallisia aineita mm. radonia. (Björkroth & Eskola 2019, 11.)

Tutkimuksessaan ”Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli, 2010” Kim Seppänen perehtyy kuntotutkimuskohteisiin ja niissä vallitseviin painesuhteisiin. Mittattu paine-ero ulkoilmaan nähden oli 176 mitatussa kohteessa keskimäärin 8 Pascalia alipaineinen. Lähes kolmanneksessa alipaineisuus ylitti 10 Pascalin rajan. (Seppänen 2010, 23.)



KUVA 1. Seppäsen tutkimuskohteiden paine-erojakauma (Seppänen 2010)

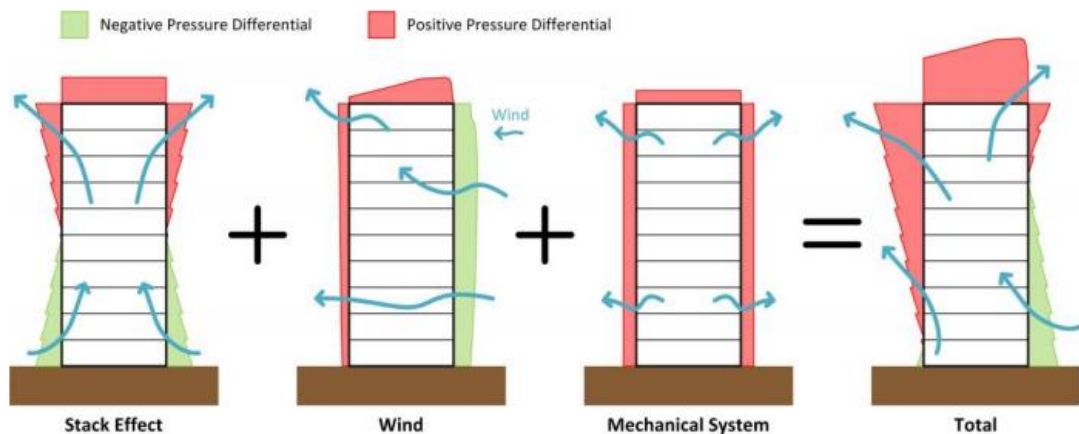
Seppänen toteaa tutkimuksensa yhteenvedosta sen, mikä kuvastakin on luettavissa. Tutkimuskohteiden alipaineet olivat keskimäärin liian alipaineisia suositeltuun 10 Pascalin paine-eroon nähden. Vaihtelua paine-eron kohdalla tuli rakennuksen iästä ja ilmanvaihdon toteutuksesta riippuen. Vuosien 2000-2007 aikana valmistuneissa kohteissa alipaineisuus oli huolestuttavan suurta, ja sen Seppänen epäilee johtuvan ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelusta ja toteutuksesta. (Seppänen 2010, 35.)

Rakennuksen painesuhteiden huomiointi jää helposti vähälle huomiolle, ja jopa uuden rakennuksen ilmanvaihdon säädön jälkeen painesuhteet on joissakin tapauksissa todettu virheellisiksi (Seppänen 2010, esipuhe).

2 TEORIA – RAKENNUKSEN PAINESUHTEET

Rakennuksessa vallitseviin painesuhteisiin vaikuttaa hormivaikutus, ilmanvaihto sekä tuuli. Nopean aikavälin muutoksia painesuhteisiin voivat aiheuttaa ilmanvaihto sekä tuuli, hormivaikutus puolestaan aiheutuu ulkolämpötilan mukaan. (Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy 1997, 60.)

Seuraavassa kuvassa havainnollistetaan rakennuksen painesuhteiden syntymistä siihen vaikuttavien tekijöiden eli hormivaikutuksen, tuulen ja koneellisen ilmanvaihdon summana. Tekijät on esitetty edellä mainitussa järjestyksessä vasemmalta oikealle. Painesuhteet siis vaihtelevat näiden tekijöiden mukaan, ja etenkin tuulen vaikutus voi olla hyvinkin hetkittäistä ja aiheuttaa suuriakin muutoksia paine-eroissa (Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy 1997, 60).



KUVA 2. Kokonaispainesuhteiden synty (Plescia 2013)

Kaava (1) esittää kokonaispaine-eron p_t laskennan, kun tiedetään terminen paine-ero p_s , tuulen aiheuttama paine-ero p_w , ja ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero p_a .

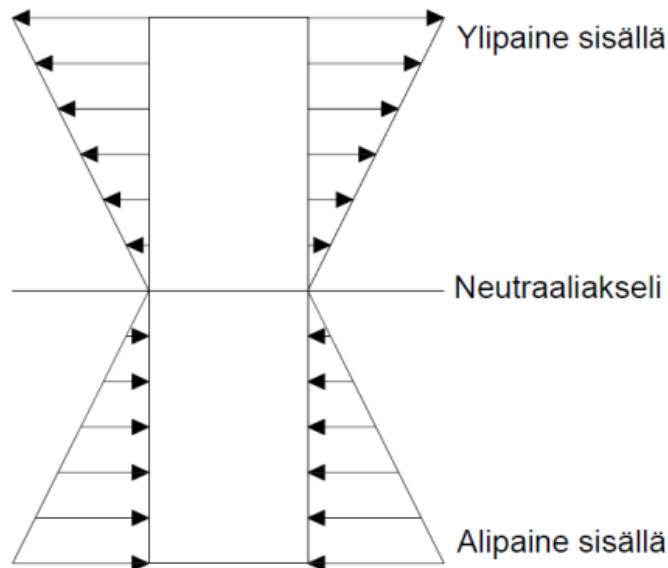
$$p_t = p_s + p_w + p_a \quad (1)$$

Ilma virtaa paine-erojen syntyessä huoneesta toiseen, eri kerrosten välillä tai rakennuksen ulkovaipan läpi. Kosteuden ja lämmön lisäksi ilmavirran mukana siirtyy haitallisia epäpuhtauksia, kuten hiukkasia, mikrobiperäisiä epäpuhtauksia, hajuja ja haitallista radonkaasua. Rakennuksen painesuhteiden selvittäminen on tärkeää, koska sen avulla voidaan selvittää rakennuksen sisäisten ilmavirtojen suuruudet sekä arvioida sen mukana siirtyvien sisäilmaan vaikuttavien epäpuhtauksien määrää. Ilman mukana siirtyvä lämpö ja kosteus on myös olennaista rakenteiden toimivuuden kannalta. (Ympäristöopas 2016, 118.)

2.1 Lämpötilaeron aiheuttama terminen paine-ero eli hormivaikutus

Kylmällä ilmalla korkeissa rakennuksissa esiintyy hormivaikutuksena tai savupiippuvaikutuksena tunnettu ilmiö. Hormivaikutus syntyy ulkoilman ja sisäilman lämpötilaerosta, jolloin rakennus toimii savupiipun lailla. Ilmiössä syntyvän luonnollisen konvektion aiheuttaa tiheysero kylmän ja lämpimän ilman välillä. Tästä johtuva paine-ero on suoraan verrannollinen rakennuksen korkeuteen sekä kylmän ulkoilman ja lämpimän sisäilman väliseen lämpötilaeroon. (Simmonds 2015, 39.)

Lämpimän ilman tiheys on pienempi kuin kylmän ilman, näin ollen lämmin ilma pyrkii ylöspäin. Ulkoilmaan verrattaessa lämmin sisäilma rakennuksessa nousee ja luo ylipainetta rakennuksen yläosaan, joka vastaavasti aiheuttaa alipaineen rakennuksen alaosaan. Ylipaineisen ja alipaineisen osan välissä sijaitsee ulkoilman painetta vastaava neutraaliakseli. Neutraaliakselin sijaintiin vaikuttaa rakenteen aukot ja ilmavuotokohdat, ilmanvaihtokanavat sekä ilmanvaihdon tasapainotus. Neutraaliakseli siirtyy korkeussuunnassa aukkojen sijaintia kohti, esimerkiksi jos rakennuksen yläosassa on paljon aukkoja, siirtyy neutraaliakseli ylöspäin. Vastaavasti neutraaliakseli siirtyy alaspäin ilmanvaihtojärjestelmän poistoilmavirran ollessa tuloilmavirtaa suurempi. (Siikanen 2014, 36; Björkroth & Eskola 2019, 37.)



KUVA 3. Hormivaikutuksen aiheuttamat painesuhteet tasatiiviissä rakennuksessa (Kuortti 2018)

Hormivaikutuksen aiheuttama paine-erojen muutos on siis merkittävin talvella. Ulko- ja sisäilman lämpötilaeron ollessa esimerkiksi 20 °C, rakennuksen sisällä neutraaliakselin yläpuolinen ylipaine kasvaa laskennallisesti 0,9 Pascalia metriä kohden. Hormivaikutuksen ja sen seurausten merkitys kasvaa rakennuksen vapaan ilmatilan kasvaessa. (Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy 1997, 58.)

Painovoimaista ilman liikettä voidaan tarkastella tarkemmin Seppäsen (1988) teoksen *ilmastointitekniikka ja sisäilmasto* mukaan. Tuulettomassa tilanteessa painovoimainen ilman liike perustuu ilman tiheyseroihin sen eri lämpötiloissa. Ilman tiheys on kääntäen verrannollinen sen lämpötilaan, ja se voidaan laskea ideaalikaasuyhtälöstä kaavalla (2)

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R_u \cdot T} \quad (2)$$

jossa

ρ	tiheys, kg/m ³
p	paine, Pa
M	ilman molaarinen massa, 29 kg/kmol
R_u	yleinen kaasuvakio, 83145 J / kmol*K
T	absoluuttinen lämpötila, K

Kaavan muuttujat voidaan olettaa vakioiksi lämpötilaa lukuun ottamatta, jolloin tiheys on kääntäen verrannollinen ilman lämpötilaan. Ilmapatsaasta syntyvä paine on näin ollen

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (3)$$

jossa

p	paine, Pa
ρ	ilman tiheys, kg/m ³
g	painovoiman kiihtyvyys, 9,82 m/s ²
h	patsaan korkeus, m

Rakennuksen korkuisen ilmapatsaan aiheuttama paine ulkona on

$$p = \rho_u \cdot g \cdot h \quad (4)$$

ja sisällä

$$p = \rho_s \cdot g \cdot h \quad (5)$$

joissa

ρ_u	ulkoilman tiheys, kg/m ³
ρ_s	sisäilman tiheys, kg/m ³
h	rakennuksen korkeus, m

Kaavojen (4) ja (5) erotus on

$$\Delta p = (\rho_u - \rho_s) \cdot g \cdot h \quad (6)$$

ja koska tiheys on kääntäen verrannollinen lämpötilaan, saadaan lauseke kaavan (2) avulla muotoon, joka on esitetty alla kaavassa (7)

$$\Delta p = \left(\frac{T_s - T_u}{T_u} \right) \cdot \rho_s \cdot g \cdot h \quad (7)$$

jossa

Δp	syntyvä paine-ero, Pa
T_s	sisäilman absoluuttinen lämpötila, K
T_u	ulkoilman absoluuttinen lämpötila, K
ρ_s	sisäilman tiheys, kg/m ³
g	painovoiman kiihtyvyys, 9,82 m/s ²
h	hormivaikutuksen korkeus, m

(Seppänen 1988, 112.)

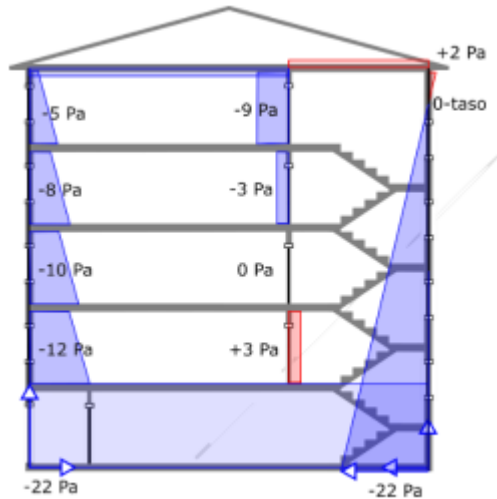
Ilmanvaihdon suunnittelun näkökulmasta hormivaikutus voi tulla ongelmaksi, koska painehäviöt lasketaan joka kerrokseen samalla ilman tiheydellä käyrästöjen ja suunnitteluohjelmistojen avulla. Vaikka ohjelmistot periaatteessa pystyisivät simuloimaan termisen lämpötilaeron vaikutusta, se on käytännössä katsoen liian työlästä useimmissa tapauksissa. (Sandberg 2016, 107.)

Hormivaikutus vaikuttaa myös rakennuksen ilmanvaihtoon. Termiset paine-erot muuttavat ilmanvaihdon ilmavirtoja sekä niiden jakautumista oikein tilojen kesken. Myös vallitseva kanavapaine vaikuttaa kanavassa syntyvään hormivaikutukseen. Ilmanvaihto ajastetaan usein toimimaan osateholla esimerkiksi yöaikaan. Osateholla kanavapaine pienenee, jolloin hormivaikutuksen voimakkuus kasvaa. (Heikkinen, Korkala, Luoma & Salomaa 1987, 67-68.)

2.1.1 Hormivaikutus suljetussa tilassa

Termiseen paine-eroon vaikuttaa se, onko eri kerrosten tilat avoimessa yhteydessä toisiinsa, vai onko niiden välillä sulkuja. Rakenteelliset sulut vähentävät termisen paine-eron vaikutusta niiden takana olevissa tiloissa. Kuvassa X on esimerkki siitä, miten hormivaikutus käyttäytyy poistoilmanvaihdolla varustetussa asuinkerrostalossa. Asuntojen ja porrashuoneen välinen ei ole täysin tiivis ja tilo-

jen väliset paine-erot saavat aikaan vuotoilmavirtauksia porrashuoneen ja asuntojen välillä. Sisätilojen väliset virtaukset puolestaan vaikuttavat asuntojen paineeroon ulkoilmaan nähden. (Björkroth & Eskola 2019, liite 1.)



KUVA 4. Esimerkkikuva suljetusta porraskäytävästä ja painesuhteista (Björkroth & Eskola 2019)

2.2 Ilmanvaihto

Rakennukset varustetaan ilmanvaihdolla, jotta sisäilma pysyy terveellisenä ja viihtyisänä. Ilmanvaihto perustuu syntyvien epäpuhtauksien poistamiseen ja puhtaan korvausilman tuomiseen (Seppänen 1996, 160). Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmasta ja ilmanvaihdosta toteaa että ”Ilmanvaihdon on toteutettava terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa. Ilmanvaihtojärjestelmän on tuotava rakennukseen riittävä ulkoilmavirta ja poistettava sisäilmasta terveydelle haitallisia aineita, liiallista kosteutta, viihtyisyyttä haittaavia hajuja sekä ihmisistä, rakennustuotteista ja toiminnasta sisäilmaan aiheutuvia epäpuhtauksia.” (Ympäristöministeriön asetus...2017, 4.)

Nykyaikaisten asetusten mukaan ilmanvaihto tulee suunnitella niin, ettei ylipaine aiheuta rakenteisiin pitkäaikaista kosteusrasitetta eikä alipaine vuorostaan sisäilman epäpuhtautta imemällä epäpuhtauksia rakenteiden läpi (Ympäristöministeriön asetus... 2017, 8; Talotekniikkainfo 2019, luku 3, kohta 21). Talotek-

niikkainfon sisäilmasto- ja ilmanvaihto-opas toteaa, että ulko- ja ulospuhallusilmavirrat on suunniteltava tasapainoon staattisessa tilanteessa, ellei rakennuksen erityisluonne edellytä muuta (Talotekniikkainfo 2019, luku 3, k. 21).

Samaisen oppaan asetustekstissä määrätään myös, että rakenteiden ilmanpityvyys ja hormivaikutuksen hallinta on suunniteltava siten, että mahdollistetaan ilmanvaihdon oikeanlainen toiminta. Lisäksi tulee varmistua, että rakenteissa ja maaperässä olevat epäpuhtaudet tai maaperän radonkaasu eivät päädy sisäilmaan ja varmistutaan että vältetään sisäilman kosteuden päätyminen rakenteisiin. (Talotekniikkainfo 2019, luku 3, k. 21.)

Vuonna 2018 kumotun asetuksen rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mukaan kosteusvaurioiden ja mikrobeista aiheutuvien terveyshaittojen välttämiseksi rakennus tulee suunnitella alipaineiseksi, joka kuitenkin ei saa olla yleensä suurempi kuin 30 Pa (D2 Suomen Rakentamismääräyskokoelma 2003, 14).

Nykyohjeissa ja asetuksissa on hieman vaihtelevia suositusarvoja rakennuksen vaipan yli olevalle paine-erolle. Absoluuttista raja-arvoa ei ole määrätty, johtuen varmastikin ulko-olosuhteiden suuresta vaikutuksesta ja ennalta-arvaamattomuudesta. On myös haastavaa määrittää ehdotonta yhteistä rajaa kaikille erityyppisille ja kokoisille rakennuksille.

Toisaalta taas talotekniikkainfon opastavassa tekstissä sanotaan, että sään vaihtelu tai rakennuksen tavanomainen käyttö ei saa muuttaa rakennuksen painesuhteita merkittävästi (Talotekniikkainfo 2019, luku 3 k. 21).

Seuraavissa taulukoissa on esitetty tavoitetasoja sisä- ja ulkoilman välisille paine-eroille. Kuvan 5 taulukon arvot on suunnattu ainoastaan ilmanvaihdon aikaansaamalle paine-erolle. Niitä voi siis soveltaa ainoastaan silloin kun tuuli tai terminen paine-ero ei vaikuta, tai kun ne voidaan poissulkea laskemalla. Esitetyt arvot ovat lähteen mukaan ehdotus tavoitetasoista.

Rakennuksen tyyppi	Normaali käyttötilanne	Maksimiarvo	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. tehostussäätöinen liesikupu, huomioitava suunnittelussa
Toimisto-, liike- tai opetusrakennus, perustapaus	+5...-5 Pa	+5...-10 Pa	Ei erillispoistoja, mitoitussilmavirta noin 2 l/(s·m ²) vähäinen kosteuslisä
Paine-erojen hallinnan kannalta vaativa kohde	+5...-15 Pa	määritetään tapauskohtaisesti	Muuttuvaimavirtaiset ja siirtoilman käyttöön perustuvat järjestelmät, suuret mitoitussilmavirrat, poikkeuksellisen tiivis ulkovaippa, erillis- tai kohdepoistoja yli 25 m korkuinen rakennus

KUVA 5. Ehdotus paine-eron tavoitetasoista (Björkroth & Eskola 2019)

Asumisterveysoppaan taulukossa on esitetty tavoitteelliset painetasot eri ilmanvaihtojärjestelmille. Ilmanvaihdon aiheuttamat paine-erot riippuvat paljolti sen toteutustavasta.

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0... -5 Pa ulkoilmaan ± 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5... -20 Pa ulkoilmaan 0... -5 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, ilmanvaihtolämmitys	0... -2 Pa ulkoilmaan ± 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan

KUVA 6. Asumisterveysoppaan tavoitteelliset paine-erotasot eri ilmanvaihtotavoille (Aurola & Välikylä 2009)

Rakennuksen painesuhteiden muutokset, jotka syntyvät koneellisesta ilmanvaihdosta riippuvat laitteiston tehokkuudesta, rakennuksen tiiveydestä sekä ilmanvaihdon päätelaitteiden määrästä ja sijoittelusta. Painesuhteisiin on mahdollista vaikuttaa myös ilmanvaihdon säädöllä. (Ympäristöopas 2016, 121.)

2.3 Tuuli

Yhtenä tekijänä rakennuksen painesuhteisiin vaikuttaa tuuli. Tuulesta rakennukseen aiheutuvan paineen suuruus riippuu tuulen suunnasta, nopeudesta ja rakennuksen pinnan muodosta. Seinäpintaan, johon tuuli osuu, aiheutuu ylipainetta. Vastakkaiselle ja sivuilla oleville seinille muodostuu puolestaan alipaine. Rakennuksessa olevien aukkojen ja epätiiveyksien sijainti vaikuttaa myös tuulen aiheuttamaan rakennuksen sisäiseen paine-eroon. Kun tuulen kohtaamalla seinällä on paljon aukkoja ja epätiiveyksiä, aiheutuu sisätiloihin enemmän ylipainetta, kuin vastaavassa tilanteessa, jossa epätiiveydet ja aukot ovat tuulen vastakkaisella seinällä, alipaineen puolella. (Ympäristöministeriö 1997, 57.)

Suomessa eniten vallitseva tuulensuunta on lounaistuuli. Tuulta esiintyy enemmän talvikuukausina kuin kesällä. Tuulen nopeus on suurempi mitä korkeammalla ollaan maan tasosta. Tämä johtuu maastossa olevista korkeuseroista, rosoisuudesta ja ilman termisestä tasapainotilasta. (Tuuliatlas 2018.)

Tuulen aiheuttama paine-ero Δp voidaan laskea eri rakennusosille käyttäen kaavaa (8)

$$\Delta p = (\mu_u - \mu_s) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (8)$$

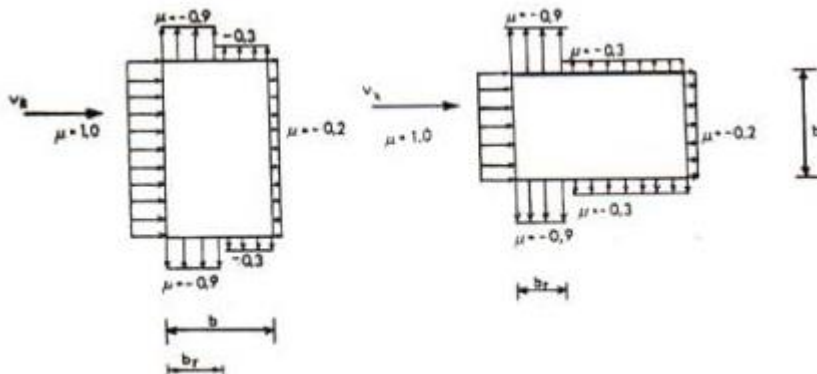
jossa

Δp	paine-ero, Pa
μ_u	rakenteen ulkopuolinen muotokerroin
μ_s	rakenteen sisäpuolinen muotokerroin
ρ	ilman tiheys, kg/m ³
v	tuulen nopeus, m/s

Positiivinen muotokerroin kuvaa ylipainetta, negatiivinen alipainetta. Vaipan yli vallitseva paine-ero voidaan määrittää ulkopuolisen ja sisäpuolisen muotokertoimen erotuksena.

Sisäpuolisena muotokertoimena käytetään yleensä arvoa -0,3. Muotokerroin ulkoseinälle on tuulen puolella 0,7...0,8 luokkaa ja suojan puolella -0,3...-0,7 luokkaa. (Ympäristöministeriö 1997, 60.)

Siikasen teoksessa (Siikainen 2014, 10) vastaavat muotokertoimet ovat tuulenpuoleisella seinällä 0,7, suojanpuolen seinällä -0,5 ja sivuseinällä -0,6...-1,2.



KUVA 7. Tasatiiviin rakennuksen muotokertoimet (Sisäilmayhdistys – Ilmavirtaukset rakennuksessa 2008)

2.4 Hormivaikutuksesta aiheutuvat ongelmat

Hormivaikutuksen aiheuttaman painesuhteiden muutokset tuovat mukanaan useita, erilaisia ongelmia. Painesuhteilla on vaikutuksensa niin asumismukavuuteen ja terveyteen, rakennuksen rakenteelliseen kuntoon ja toimintaan kuin tekniseen toimivuuteen.

Kosteusvaurioriski aiheutuu, kun ylipaine puskee kostean sisäilman rakenteisiin. Ilman kosteus tiivistyy kylmiin rakenteisiin ja aiheuttaa kosteus- ja homevaurioita. (Sisäilmayhdistys – Ulkoseinät 2008.)

Liiallinen alipaine aiheuttaa korvausilman hallitsemattomuutta. Kun korvausilma imeytyy rakenteiden läpi eikä suunniteltuja korvausilmareittejä pitkin, alkaa mukana tulla sisäilmalle haitallisia aineita. Rakenteiden epäpuhtauksien lisäksi ilma voi saastua esimerkiksi maaperästä imeytyvästä radonkaasusta. (Ympäristöopas 2016, 118.)

Hallitsemattomista painesuhteista aiheutuvat ilmavirtaukset kuljettavat epäpuhtauksien ja kosteuden lisäksi mukanaan myös lämpöä. Tämä johtaa energiahukkaan ylimääräisten lämmityskustannusten muodossa. Ilmavirtauksista aiheutuu lisäksi vedon tunnetta, mahdollista äänekästä suhinaa vuotokohtissa kuten ovien tai ikkunoiden raoissa ja ovien avaamisen vaikeutumista. (Ympäristöopas 2016, 118; Nybergh 2014, 21-22.)

Hormivaikutuksen seurauksesta myös palonsammutusjärjestelmien toiminta saattaa heikentyä (Lee 2012, 2). Tästä saattaakin aiheutua jopa kohtalokkaita seurauksia asukkaiden tai rakennuksen kannalta.

3 SUUNNITTELURATKAISUT PAINESUHTEIDEN HALLINTAAN

Hormivaikutuksen hallintaan on useita rakenteellisia ja arkkitehtuurisia keinoja, kuten rakenteiden tiivistäminen, osastoivien sulkujen kuten ovien lisääminen ja pyöröoven käyttö. Työssä keskitytään kuitenkin enemmän teknisten ratkaisujen läpi käymiseen.

Hormivaikutuksen seurauksia ei voida poistaa kokonaan, mutta sen hallintaa voidaan edistää rakenteellisilla ja teknisillä ratkaisuilla. Lähtökohtaisesti rakenteelliset ratkaisut ovat osoittautuneet teknisiä ratkaisuja paremmiksi hormivaikutuksen hallinnan kannalta. (Ranta-aho 2016.)

Sandberg (2016, 107) toteaa teoksessaan, että kanavapaineisiin ja ilmavirtoihin vaikuttava ilmanpaineen muutos tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Niin voidaan todeta myös tehtyjen mittausten ja simulointien perusteella.

Ilmanvaihtojärjestelmä voidaan osastoida erillisjärjestelmiin. Järjestelmän ylimmän ja alimman päätelaitteen välille voidaan arvioida enimmäiskorkeusero kaavan (9) avulla.

$$D_{max} = \frac{600}{T_s - T_{u,min}} \quad (9)$$

jossa

D_{max}	Enimmäiskorkeusero, m
T_s	Suunniteltu sisälämpötila, °C
$T_{u,min}$	Ukolämpötilan suunnittelu-arvo talvitilanteessa, °C

Paine-eron mukaan säätyvä ilmanvaihtojärjestelmä auttaa termisen paine-eron ongelmissa. Kerroskohtaisten painesäätimien avulla pidetty vakiopaine huolehtii siitä, että paine riittää kaikissa tilanteissa. Painesäädön avulla ilmavirrat pysyvät talvitilanteessakin hallussa, minkä lisäksi se mahdollistaa pienemmät kanavapaineet. (Sandberg 2016, 109.) Tässäkin tapauksessa tulee tarkastaa maksimikorkeusero päätelaitteiden välillä tapauskohtaisesti (Talotekniikkainfo 2019, luku 3, k. 21).

Paineohjattu ilmanvaihto on hyvä kohteissa, joissa on riski hormivaikutukseen myös siksi, että järjestelmää ei tarvitse ylimitoittaa painesuhteiden hallinnan varalta, jolloin siis saavutetaan energiansäästöä sekä säästö materiaalikuluissa. Asuinkerrostaloissa voidaan valita keskitetyn ilmanvaihdon sijaan asuntokohtainen järjestelmä, jolloin korkeissa kanavanousuissa syntyvää hormivaikutusta ei tarvitse huomioida.

Asuntokohtaisen järjestelmän avulla korkeat asuinrakennukset ovatkin hormivaikutuksen näkökulmasta helpompia toteuttaa kuin korkeat rakennukset, joissa ei voida käyttää hajautettua ilmanvaihtojärjestelmää.

Erittäin korkeissa rakennuksissa kyseeseen voi tulla ilmanvaihdon paineistaminen hormivaikutuksen hallitsemiseksi tai hormivaikutusta aiheuttavan kuilun jäähdytys eli lämpötilaeron laskeminen. Paineistamisella tarkoitetaan alempien kerrosten ylipaineistusta ilmanvaihdolla ylempien kerrosten alipaineistusta. Toimenpide kompensoi hormivaikutuksen aiheuttamia päinvastaisia paineita. Paineistamisella saadaan vähennettyä yli- ja alipaineisuutta. Menetelmää käyttäessä on huomioitava se, että paineistamisesta saattaa aiheutua suuria rakennuksen sisäisiä ilmavuotoja tai niiden muuttumista. Tutkimuksessaan Ranta-aho (2016) toteaa, että tutkimuskohteen paineistaminen ei ole kannattavaa menetelmän aiheuttamien sisäisten ilmavirtojen takia. (Ranta-aho 2016, 91-96.)

Hyvä keino hormivaikutuksen hallintaan on minimoida sen aiheuttaja, eli ulko- ja sisäilman lämpötilaero. Tämä voidaan toteuttaa jäähdyttämällä kuilua, jossa hormivaikutus syntyy. Kuilun jäähdytys laskee lämpötilaeroa ja näin ollen hormivaikutusta koko rakennuksessa. (Lee 2012, 3-4.)

4 MITTAUKSET

Aiheen hahmottamisen, mahdollisesti uusia ajatuksia avaavien tulosten ja käytännön oppimisen kannalta työhön liittyen tehtiin paine-eromittauksia. Mittauskohteena toimi Tampereen ammattikorkeakoulun korkein osa, B-siipi.

Ulkoilman olosuhteet vaikuttavat merkittävästi paine-eromittausten tuloksiin. Tämän vuoksi käytössä oli myös tuulimittari ja ulkoilmaan sijoitettu lämpömittari. Niillä kerätyn datan avulla voidaan paremmin tulkita mitattua paine-eromittausdataa.

4.1 Kohde

Tampereen ammattikorkeakoulun B-siipi on 6 kerroksinen vuonna 1967 valmistunut korkeakoulukampuksen osa. B-siipi on kampuksen korkein osa ja sijaitsee rakennuksen keskustassa. Rakennukseen on sittemmin tehty muun muassa ilmanvaihdon muutostöitä vuonna 2001. Kuva 8 havainnollistaa rakennuksen sijaintia ilmansuuntiin nähden.



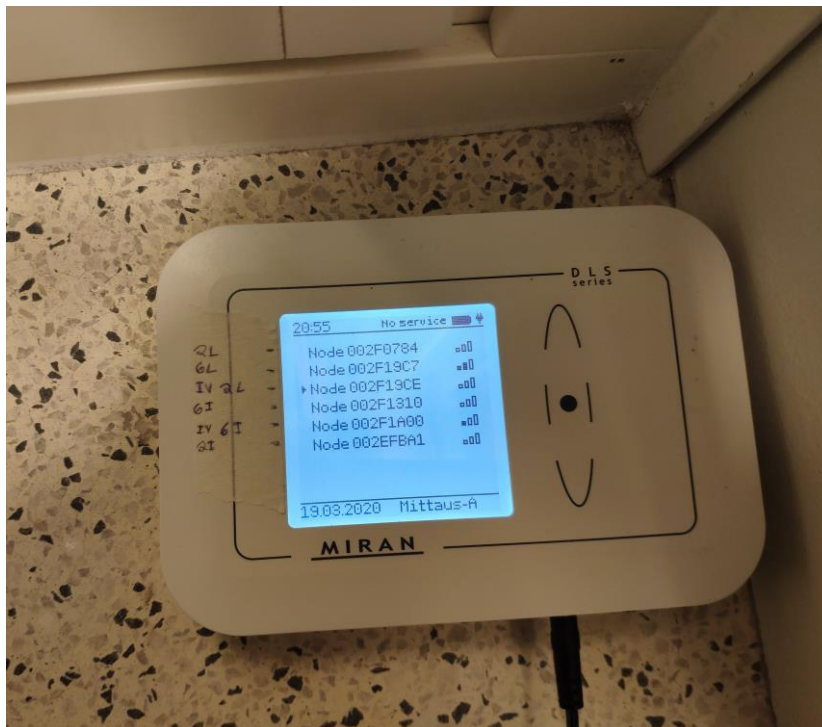
KUVA 8. Rakennuksen sijainti sekä ilmansuunta kartalla (Google maps 2020)

B-siipi on varustettu kolmella vakioilmavirtakoneella. Osassa tiloista ilmanvaihto on varustettu myös jäähdytyspaneeleilla. Rakennuksessa on kolme porraskäytävää ja kaksi hissikuilua, joissa hormivaikutusta voidaan ajatella syntyvän. Kuilujen ja mittaustilojen välillä on yksi tai useampi palo-ovi, jotka hillitsevät hormivaikutusta kuilun ulkopuolella.

4.2 Paine-eromittaukset

Paine-ero mittauksiin käytettiin Miran DLS loggerijärjestelmää. Järjestelmä koostuu antureita sisältävistä langattomista lähettimistä sekä keskusyksiköstä. Se on suunniteltu kosteuden, lämpötilan, hiilidioksiditason ja painesuhteiden mittaamiseen ja seurantaan. Järjestelmän käyttötarkoitus on useimmiten kiinteistön laaja olosuhdeseuranta.

Keskusyksikkö ja lähettimet ovat langattomasti yhteydessä toisiinsa. Järjestelmä tallentaa eli loggaa mittaustietoa käyttäjän määrittämällä aikavälillä. Data on tallennettavissa keskusyksikön kautta, kun se yhdistetään tietokoneeseen.



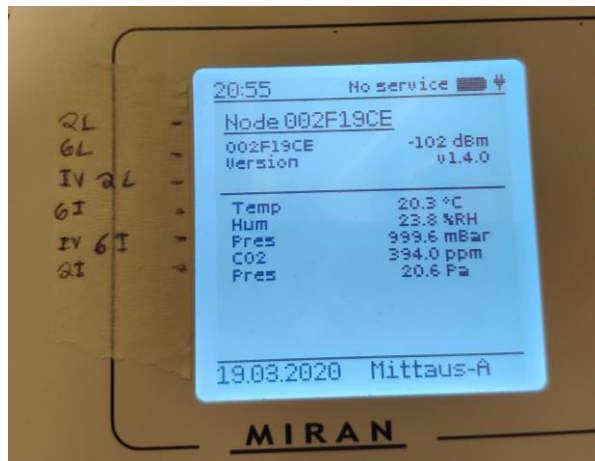
KUVA 9. Miran DLS keskusyksikkö

Keskusyksikössä on näyttö, hipaisunäppäimet, virtanappi sekä liitännät verkkovirralle ja usb-laitteelle. Mittaustulokset on luettavissa reaaliaikaisesti näytöltä.



KUVA 10. Miran DLS lähetinyksikkö.

Lähetinyksikössä ei ole painikkeita tai kytkimiä. Laite on valmiudessa ja yhdistyy kun keskusyksikköön kytketään virta. Lähettimessä on anturit lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle, barometriselle paineelle, hiilidioksidipitoisuudelle sekä paine-erolle. Kunkin lähettimen reaaliaikaisia tietoja voi tarkastella keskusyksikön lähetinnäkymästä.



KUVA 11. Lähetinnäkymän tiedot

Järjestelmän loggaamat mittaustiedot siirretään tietokoneelle kytkemällä keskusyksikkö tietokoneen usb-väylään. Siirtäminen tapahtuu toimintoon tarkoitetulla Miran configuration tool -ohjelmistolla. Ohjelmiston kautta pystyy tiedon siirtämisen lisäksi muuttamaan mittauksen asetuksia.

4.3 Ulkoilman olosuhdemittaukset

Sääolosuhteet ovat merkittävä ulkoinen tekijä paine-eroa mitattaessa. Tarkimman mahdollisen ulkoilmaolosuhteen saavuttamiseksi mitattiin paikallisesti sekä tuulta että ulkolämpötilaa.



KUVA 12. Järjestelmän sisäyksikkö

Mittaukseen käytettiin Netatmon Smart Home Weatherstation -langatonta sääasemaa. Järjestelmään kuuluu sisäyksikkö, ulkoyksikkö sekä tuulimittari. Järjestelmä mittaa niin ikään loggaavasti. Tiedot ovat myös reaaliaikaisesti luettavissa Netatmon verkkopalvelusta tietokoneella tai älypuhelimella.



KUVA 13. Lämpötilaa mittaava ulkoyksikkö

Ulkoyksikkö asennettiin niin, että suora auringonpaiste vääristäisi tuloksia mahdollisimman vähän.



KUVA 14. Netatmo tuulimittari

Tuulimittari asennettiin rakennuksen katolle. Oikea suunta varmistettiin kohdistamalla pohjoisnuoli tarkasti ilmansuuntien mukaan.

4.4 Mittaukset käytännössä

Mittauksista oli tarkoitus selvittää rakennuksen eri tilojen painesuhteita, hormivaiikutuksen ilmenemistä, sääolosuhteiden vaikutusta painesuhteisiin sekä edellä mainittujen seikkojen vaikutusta ilmanvaihdon toimintaan.

Paine-eromittaus vaipan yli järjestettiin niin, että mitattiin paine-eroa vastaavallisista luokkatiloista kahdesta eri kerroksesta. Valittiin alin ja ylin kerros, joissa mittaukset onnistuivat, jotta kerrosten välinen paine-ero on mahdollisimman suuri. Mittaukset päädyttiin tekemään 2. ja 6. kerroksissa. Järjestelmän keskusyksikkö sijoitettiin 4. kerrokseen, jotta langattoman yhteyden kantavuus riittäisi hyvin kummankin kerroksen lähettimille.

Tuulen vaikutus painesuhteisiin on merkittävä. Vaikutusta ei pystytä täysin suodattamaan pois tuloksista, mutta tulkintaa auttaa, kun sijoitetaan mittarit rakennuksen eri julkisivuille. Kumpaankin kerrokseen asennettiin siis kaksi mittaria, toinen idän puoleiselle ja toinen lännen puoleiselle seinälle. Tällöin kun mittauksissa todetaan suurta poikkeamaa tilojen välillä, joissa normaalitilanteessa vallitsee samansuuruinen paine-ero ulkoilmaan nähden, voidaan sen päätellä johtuvan tuulesta.

Lähetimissä oleva paine-eroanturi on niin sanottu läpivirtausanturi, eli sen toiminta perustuu anturin läpi virtaavaan ilmaan. Mittausyhteiden välille tulee siis saada paine-ero. Tämä tapahtui käytännössä niin, että toisesta yhteestä johdettiin putki luokkatilan tuuletusikkunan kautta ulos. Kestävärakenteinen pneumaattikaputki ei litistyi, vaikka tuuletusikkunan sulkee ja lukitsee.

Mittauksissa käytettiin apuna ympäristöministeriön paine-erojen mittausohjetta. Björkrothin ja Eskolan (2019) ohjeessa opastetaan, että ohut, yhden millimetrin sisähalkaisijan omaava kapillaariputki soveltuu paine-eron mittaamiseen vaipan

yli. Useiden testauksien jälkeen kapillaariputken todettiin kuitenkin kuristavan virtaamaa merkittävästi verrattuna pneumatiikkaputkeen, jonka sisähalkaisija on 2,5mm. Sähköpostikeskustelu laitevalmistaja Pietikon asiantuntijan kanssa vahvistaa, että kapillaariputki kuristaa virtaamaa ja vääristää mittaustulosta merkittävästi, eikä näin ollen sovellu käytettäväksi läpivirtausanturien kanssa.



KUVA 15. Paine-eromittaus vaipan yli

Ikkunan välin osuus vietiin läpi puristuksen kestäväällä pneumatiikkaputkella, loppupätkä lähettimelle paksummalla silikoniletkulla. Ulkopuolelle lisättiin pätkä suurempaa silikoniletkua, jotta roskat tai vesipisarot eivät tukkisi putkea yhtä helposti. Seinästä hieman ulkoneva letku auttaa myös pahimpia virtauksia vastaan.



KUVA 16. Sininen pneumatiikkaputki tuuletusikkunan läpi

Mittauksia tehtiin näiden lisäksi ilmanvaihdon päätelaitteista. Ala- ja yläkertaan asennettiin yhdet mittaukset. Mittari liitettiin tuloilmalaitteen mittausyhteisiin, joista se mittaa paine-eroa säätölaitteen yli. Tuloilmalaitteen virtaama q_v saadaan kaavasta (10), kun tiedetään päätelaitteen k -arvo ja mitattu paine-ero Δp (Sandberg 2016, 116).

$$q_v = k \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (10)$$



KUVA 17. Mittaus tuloilmalaitteesta

Mittauksia tehtiin lisäksi poistoilmalaitteesta niin ikään virtaaman ja sen vaihteluiden selvittämiseksi. Mittari yhdistettiin päätelaitteen mittausletkuun ja mittarin toiseen yhteeseen liitettiin letku, joka johdettiin lähemmäs huoneen oleskeluvyöhykettä.

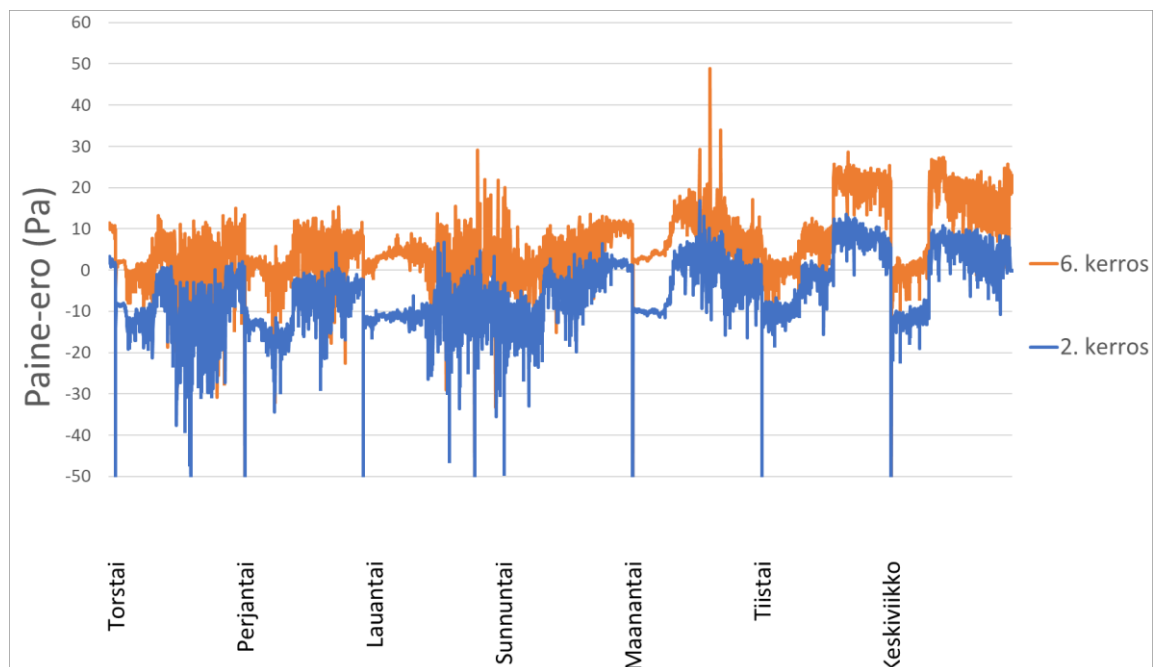


KUVA 18. Mittaukset poistoilmalaitteesta

4.5 Mittaustulokset

Mittauksia pyrittiin järjestämään ympäristöministeriön julkaiseman paine-erojen mittausohjeen mukaisesti. Seurantamittauksen suositeltu kesto on 1-2 viikkoa. Mittauksen avulla voidaan selvittää mittausjakson keskimääräinen paine-ero, sääolojen ja rakennuksen käytön vaikutus paine-eroon, ilmanvaihtolaitteiden käyntiajat sekä ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero. (Björkroth & Eskola, 2019)

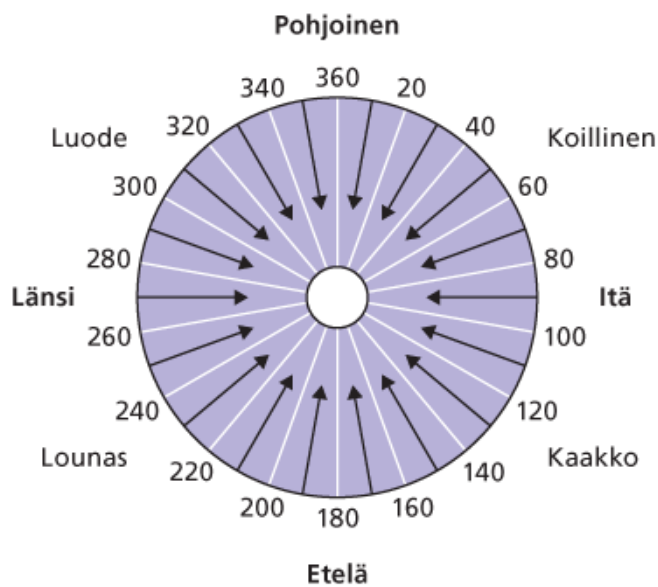
Kuvion 1 kuvaajassa esitetään itäisen fasadin mittaukset toisessa ja kuudennessa kerroksessa viikon ajalta. Kuvaajasta on nähtävissä, että saman seinustan eri kerroksen mittaukset noudattavat toisiaan keskenään muistuttavaa linjaa. Kuudennessa kerroksessa on toista kerrosta suurempi paine-ero ulkoilmaan nähdessä hormivaikutuksen takia. Vaihtelut kuvaajassa aiheuttaa tuulen ja ulkolämpötilan vaihtelut, rakennuksen käyttö sekä ilmanvaihdon käytön ajastus. Kyseinen kuvaaja on muodostettu niin monen mittauspisteen perusteella, että siitä on järkevästi luettavissa ainoastaan suurpiirteinen paine-ero ja sen suurimmat muutokset.



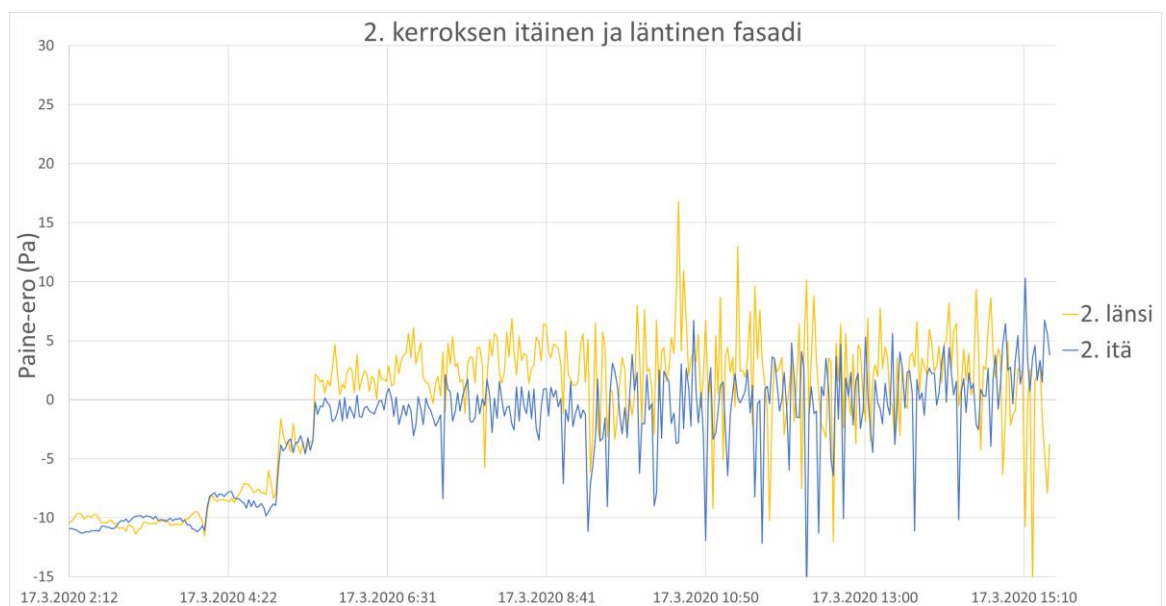
KUVIO 1. Itäisen fasadin paine-ero 12.-19.3.

4.5.1 Tuulen vaikutus ilmanvaihtoon

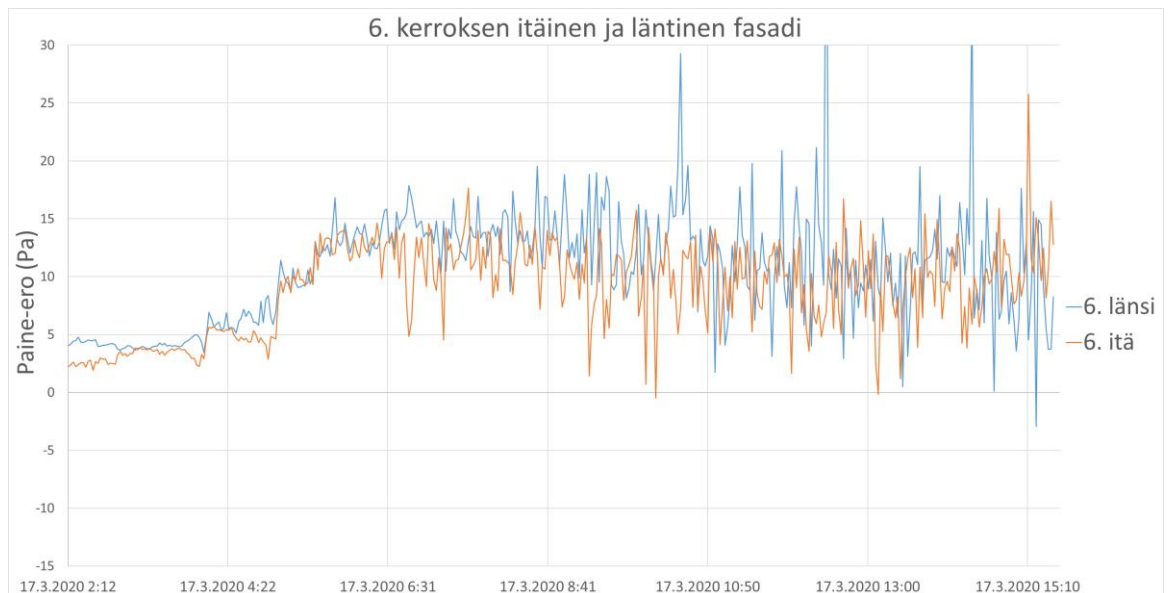
Seuraavissa kuvioissa 2 ja 3 on havainnollistettu yhden päivän paine-eroja aamuyöstä iltapäivään. Kuviossa 4 esitetään saman ajan tuulen nopeus ja suunta. Myös mittarin mittaamat hetkittäisen puuskan nopeus ja suunta esitetään kuvajassa, sillä ne kertovat paremmin hetkittäisestä tuulesta keskimääräisen mittaus-tiedon sijaan. Kuviossa 4 tuulen suunta on esitetty asteina kuvan 19 mukaisesti.



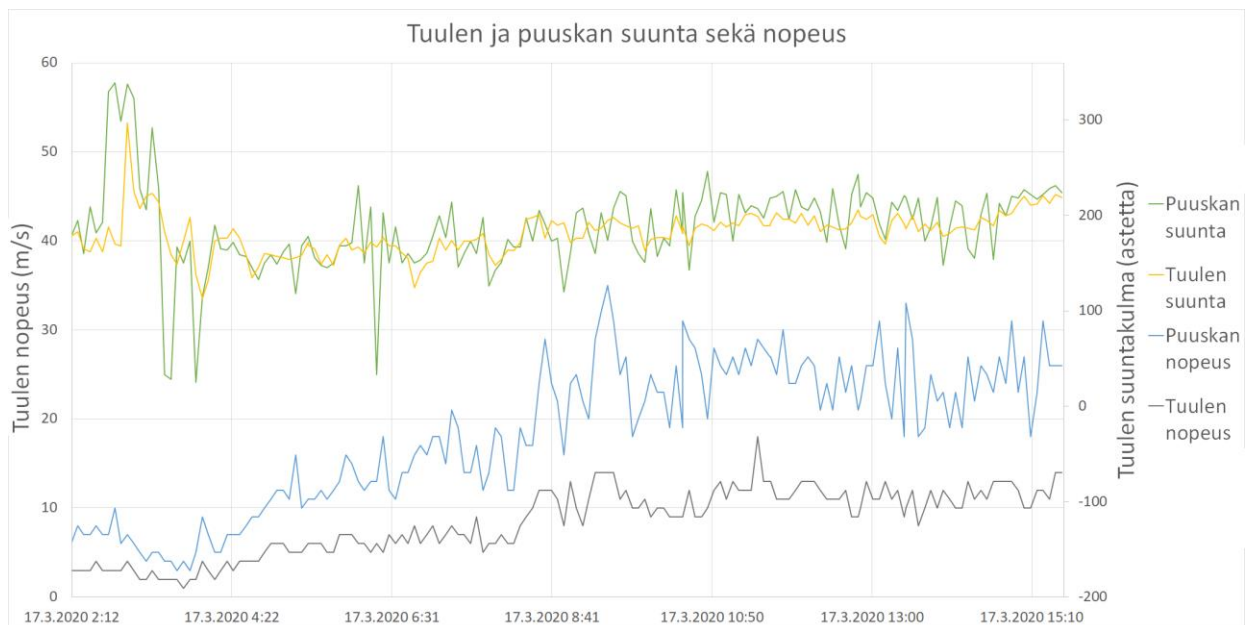
KUVA 19. (Tuuliatlas 2009)



KUVIO 2. 2. kerroksen paine-ero ulkoilmaan nähden



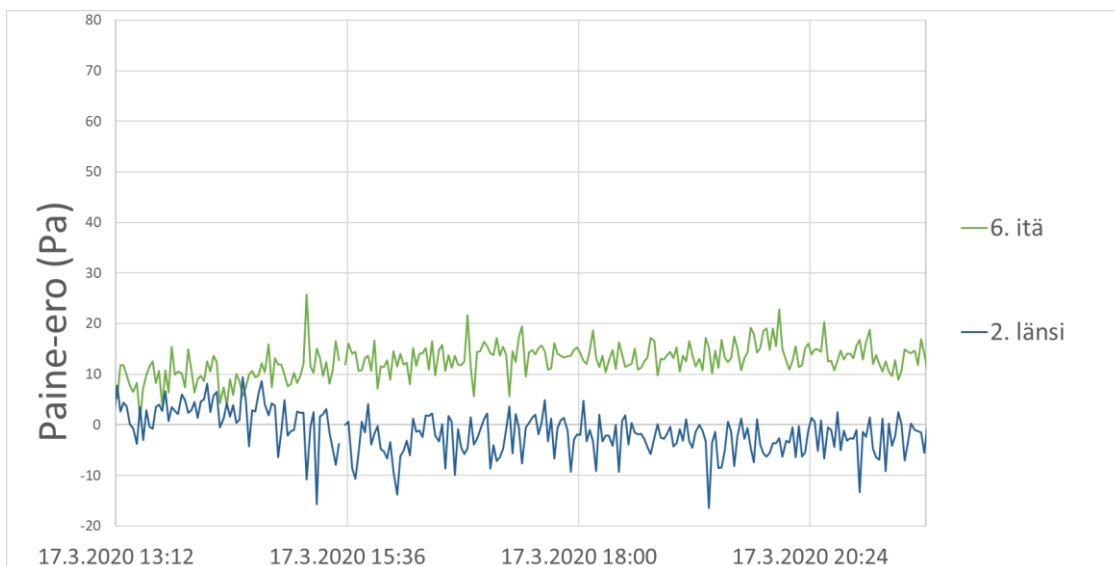
KUVIO 3. 6. kerroksen paine-ero ulkoilmaan nähden



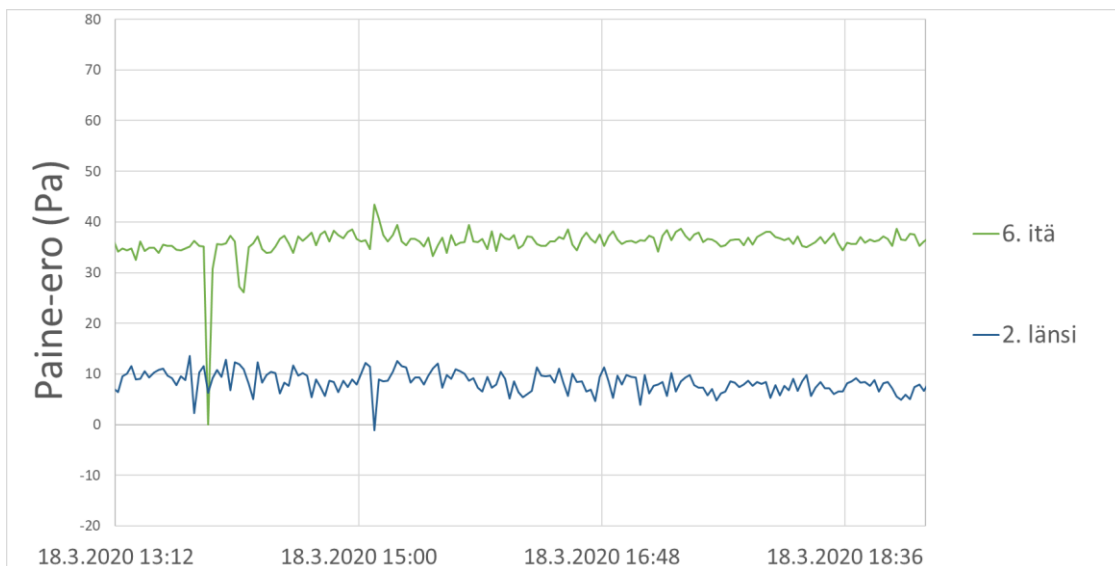
KUVIO 4. Tuulen suunta ja nopeus

Hormivaikutus saa jälleen aikaan kuvioista 2 ja 3 nähtävän eroavaisuuden eri kerrosten välisissä paine-eroissa. 2. kerrokset ovat huomattavasti vähemmän yli-paineisia kuin 6. kerrokset. Voidaan myös huomata, että kummankin kuvion läntisellä fasadilla on mittausaikana vallinnut suurempi ylipaine ulkoilmaan nähden suurimman osan ajasta. Vastakkaisten fasadien paine-eron eroavaisuus johtuu tuulesta, sillä tuulen suuntaa tarkastellessa huomataan kulman pysyneen suunnilleen samana päivän ajan.

Seuraavaksi on tarkasteltu tuulen vaikutusta ilmanvaihtoon. 17.3. ja 18.3. rakennuksen vaipan yli mitatut paine-erot kuvioissa 5 ja 6 eroavat merkittävästi keskenään. Eron voidaan olettaa johtuneen tuulesta, sillä lämpötila päivien välillä ei juuri poikkea toisistaan, jolloin terminen paine-ero ei muutu. Mittauspisteet olivat itäisellä seinustalla kerroksessa 6 sekä läntisellä seinustalla kerroksessa 2.

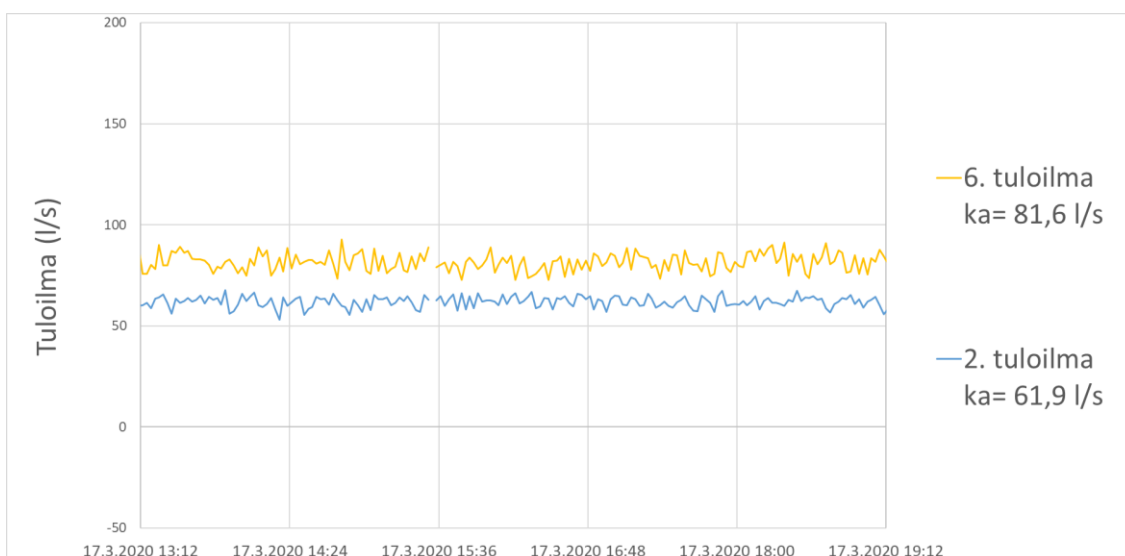


KUVIO 5. Paine-ero vaipan yli 17.3.

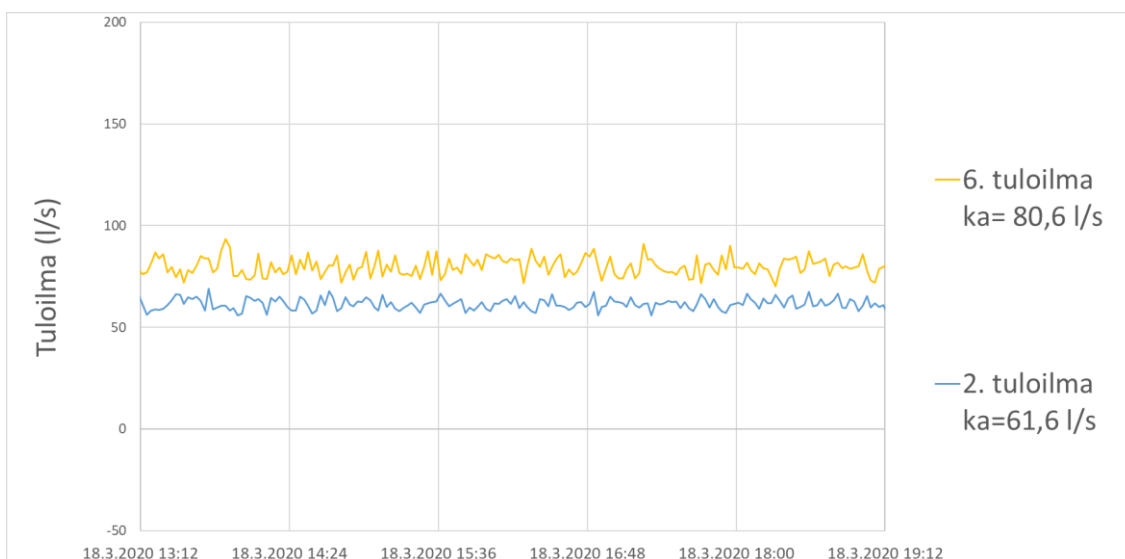


KUVIO 6. Paine-ero vaipan yli 18.3.

Näihin tuloksiin verraten tarkastellaan seuraavissa kuvioissa 7 ja 8 esitettyjä tuloilmalaitteiden virtaamia. Saatujen tulosten perusteella huomataan, että muutoksia virtaamissa ei juurikaan ole havaittavissa. Mitatut virtaamat pysyivät hyvinkin samankaltaisina eri päivien välillä, vaikka paine-ero ulkoilmaan nähden muuttui merkittävästi. Voidaan siis päätellä, että tuulen aiheuttama paine-ero ei vaikuttanut rakennuksen sisäisiin painesuhteisiin. Voimakas muutos painesuhteissa rakennuksen sisällä näkyisi myös ilmanvaihdon virtaamissa.



KUVIO 7. Eräiden tuloilmalaitteiden virtaamat 17.3.



KUVIO 8. Tuloilmalaitteiden virtaamat 18.3.

4.5.2 Termisen paine-eron vaikutus ilmanvaihtoon

Termisen paine-eron voi olettaa vaikuttavan ilmanvaihtoon lämmityskaudella jatkuvasti silloin, kun ulko- ja sisäilman välillä on lämpötilaeroa. Mittauksissa sen toteamiseen vaaditaan termisen paine-eron muutoksia, eli ulko- ja sisäilman lämpötilaeron muutosta. Mittauksissa tuli siis tarkkailla ajankohtia, jolloin ulkolämpötila muuttui mahdollisimman paljon. Sisälämpötilan oletetaan pysyneen samana.

Reilun viikon ajalta kerätyn mittausdatan perusteella tarkasteltiin tiettyjen tulo- ja poistoilmalaitteiden ilmavirtoja kahdessa eri tilassa, yksi toisessa ja toinen kuudennessa kerroksessa. Kullekin laitteelle laskettiin aamu-, päivä- ja iltakohtaiset ilmavirtakeskiarvot. Lukemat on esitetty litroina sekunneissa.

TAULUKKO 1.

		6. kerros tuloilma	2. kerros tuloilma	6. kerros poistoilma	2. kerros poistoilma	Ulkolämpötila
4.4.	Aamu	51,7	79,4	139,7	157,9	0,2
	Päivä	52,0	79,7	140,6	157,5	6,0
	Ilta	52,0	79,6	140,3	158,0	2,0
6.4.	Aamu	52,8	81,5	142,0	159,9	1,4
	Päivä	52,8	81,2	139,6	156,5	10,0
	Ilta	52,6	82,8	138,6	155,8	11,5
7.4.	Aamu	52,6	80,8	140,3	155,8	6,9
	Päivä	52,3	80,8	137,1	154,2	15,7
	Ilta	52,4	80,8	139,7	156,6	8,9
8.4.	Aamu	52,8	81,1	141,0	158,8	5,3
	Päivä	52,5	80,9	139,5	157,1	13,4
	Ilta	52,1	80,9	137,6	155,5	10,1
9.4.	Aamu	51,4	80,0	139,3	157,2	6,4
	Päivä	51,3	78,5	140,2	157,7	9,6
	Ilta	51,7	80,4	140,1	157,9	6,1
10.4.	Aamu	52,02	79,75	141,36	160,14	2,0
	Päivä	51,85	80,61	141,31	158,26	7,6
	Ilta	52,07	79,72	141,73	159,75	2,8
13.4.	Aamu	50,90	77,54	138,00	154,96	3,4
	Päivä	50,77	78,60	137,97	154,48	4,9
	Ilta	50,91	78,94	138,47	154,42	1,6
14.4.	Aamu	50,85	78,57	138,79	156,37	0,5
	Päivä	50,82	78,51	139,58	156,74	3,3
	Ilta	51,11	78,81	139,31	157,24	1,8

Tuloksista on lievästi nähtävissä hormivaikutuksen voiman heikkenemistä lämpötilan noustessa, mutta muutokset ovat hyvin pieniä sekä hieman epäjohdonmukaisia. Vähäinen vaikutus johtuu luultavasti siitä, että mittausten aikainen lämpötilaeron muutos sekä kuusikerroksisen rakennuksen korkeus eivät riittäneet luomaan merkittävää termistä paine-eroa. Taustalla voi olla vähäisen lämpötilaeron lisäksi myös muita tekijöitä. Jos hormina toimivan porraskäytävän palo-ovet ovat riittävän ilmatiiviit, myös ne vähentävät hormivaikutuksen voimaa käytävillä merkittävästi.

Täsmällisempää tarkastelua varten tulisi mittaukset tehdä kesätilanteessa lämpimällä kelillä ja talvitilanteessa mahdollisimman kylmässä olosuhteessa. Näissä olosuhteissa verrattaessa tuloksista olisi luettavissa johdonmukaisempaa muutosta.

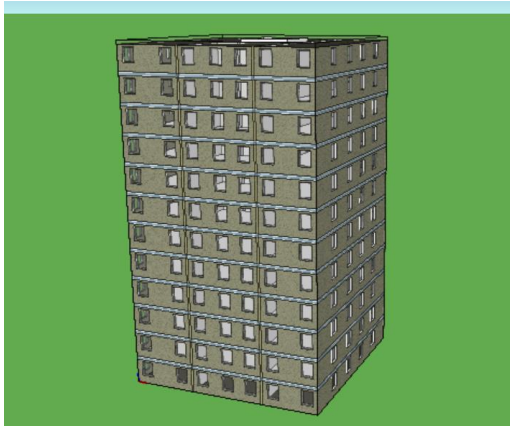
5 SIMULOINNIT

Simulointiin käytettiin IDA Indoor and Climate Energy ohjelmistoa. IDA ICE on dynaaminen monivyöhykemallinnukseen kykenevä ohjelma, jota voidaan käyttää muun muassa rakennuksen lämpötaseen ja energiankulutuksen tutkimiseen (Equa 2020).

Ohjelmalla pystyy myös simuloida rakennuksen ja sen tilojen välisiä ilmavirtoja. Simulointien päämääränä on tarkastella hormivaikutuksesta aiheutuvien paine-erojen muutoksia simulointimalleissa eri olosuhteissa. Paine-erot ilmenevät ilma-
vuotoina mallin ulkovaipan yli ja tilojen välillä.

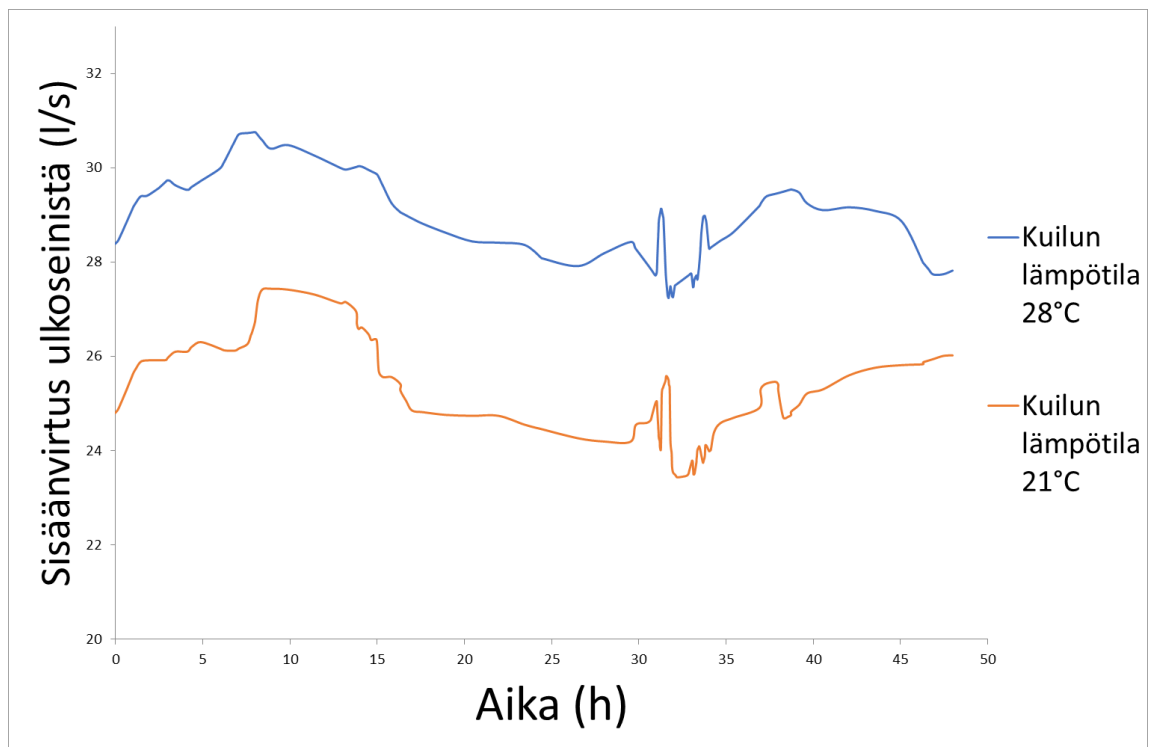
Työssä tarkasteltiin talviolosuhteiden aikaisia ilmavirtoja ja niiden muutoksia siitä näkökulmasta, että suunnittelu tai rakentaminen on ollut huolimaton. Hormivai-
kutusta käsittelevissä tutkimuksissaan Ilari Ranta-aho ja Christina Nybergh ovat osoittaneet, että kuilun jäähdytyksellä ja ilmanvaihdon paineistuksella voidaan lieventää hormivaikutuksen ilmenemistä. Paineistusta ei tosin suositella sen aiheuttamien sisätilojen välisten vuotojen lisääntymisen takia. (Nybergh 2014; Ranta-aho 2016.)

Näiden pohjalta tutkitaan miten suuri vaikutus olisi tapauksissa, joissa kuilu onkin muita tiloja lämpimämpi tai ilmanvaihdon tasapaino on hormivaikutuksen kan-
nalta halutun asetelman vastainen, eli ylipaineinen yläkerrassa ja alipaineinen alakerrassa. Tarkastellaan siis tilanteita, joissa suunnittelu tai rakennusvirhe aiheuttaa epätoivotun hormivaikutuksen kasvamista.



KUVA 20. Simuloinneissa käytetty kerrostalomalli

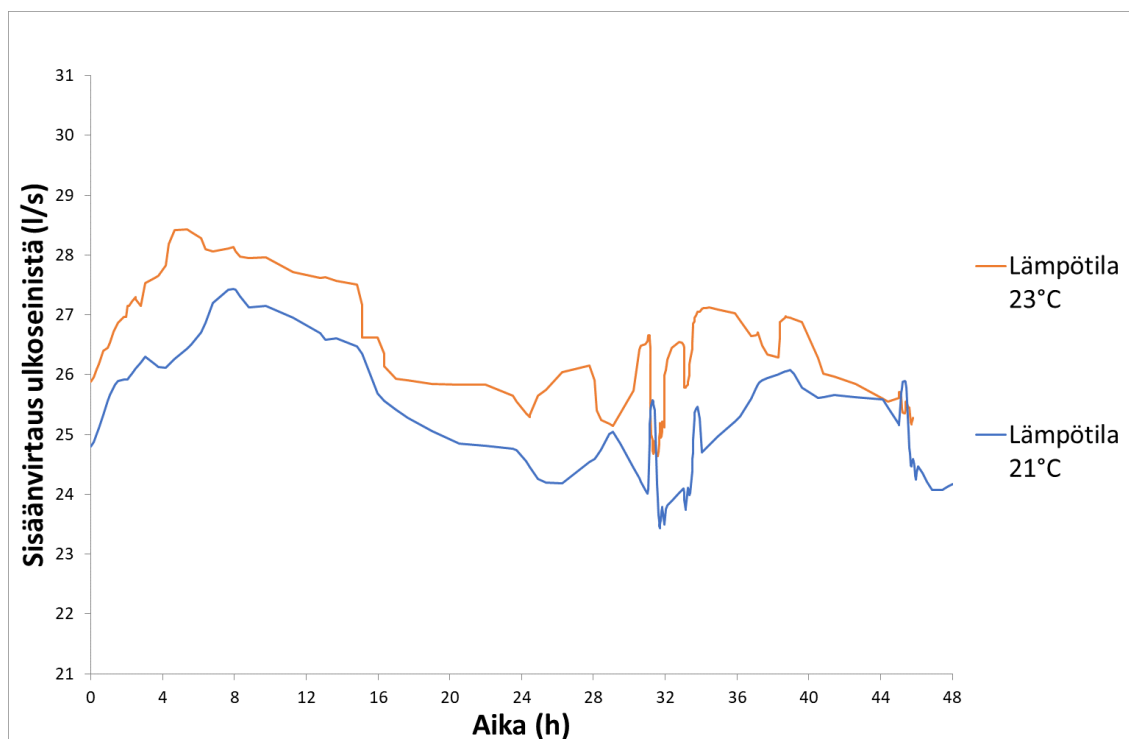
Käytetty malli oli rakenteeltaan hyvin yksinkertainen kerrostalo, jonka keskellä oli avoin kuilu alakerrasta ylös asti. Rakennuksessa on 12 kerrosta. Avoin kuilu vastaa porraskäytävää. Kuvion 9 esimerkissä on simuloitu saman säätiedoston avulla kahdella eri kuilun lämpötilalla ja tarkkailtu alimman kerroksen asunnon sisäänpäin suuntautuvaa vuotoilmaa ulkoseinästä. Vuotoilma ulkoseinästä kertoo tilan alipaineisuudesta ulkoilmaan nähden.



KUVIO 9. Sisäänvirtauksen muutos lämpötiloilla 28°C ja 21°C

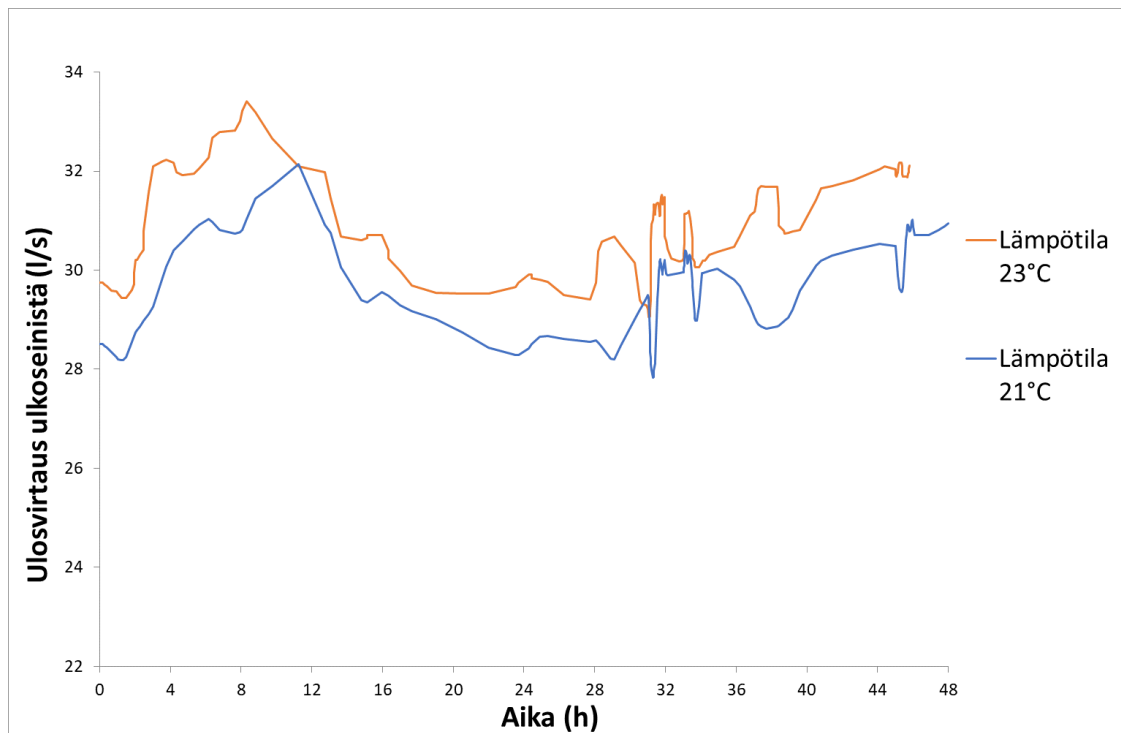
Teoreettisen esimerkkihavainnon perusteella voidaan todeta, että lämpötilan nosto kuilussa lisäsi alipaineisuutta alimmassa kerroksessa niin, että virtaus ulkoseinästä kasvoi noin 15%. Tilanne, jossa kuilun lämpötila nousisi lämmityskaudella 28°C lämpötilaan, ei kuitenkaan ole kovin realistinen.

Seuraavassa tapauksessa tarkastellaan alipaineisuuden muutosta normaalilämpötilaan 21°C nähden tilanteessa, jossa kuilun lämpötila on 23°C. Vastaava virheellinen korkeampi lämpötila saattaisi aiheutua esimerkiksi suunnitteluvirheestä, toteutusvirheestä tai rakennuksen väärästä käytöstä.



KUVIO 10. Alimman kerroksen sisäänvirtauksen muutos

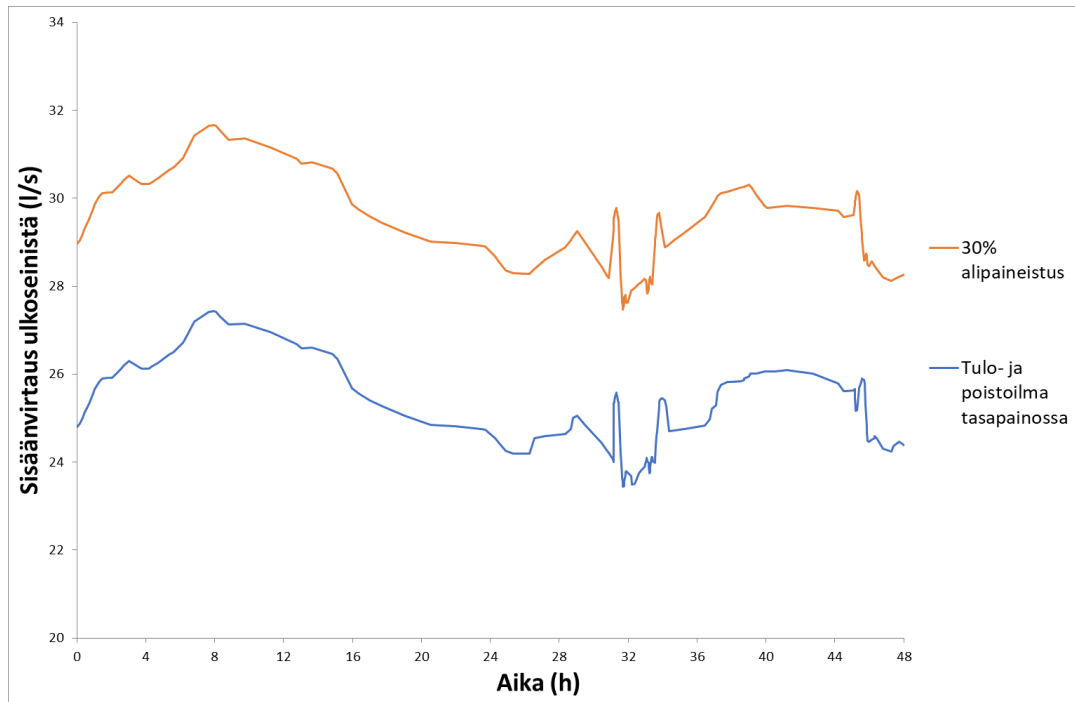
Pienelläkin lämpötilan nousulla muutos rakenteiden läpivirtauksiin on merkittävä. Kahden lämpöasteen nousu porraskuilussa nosti alimman kerroksen ulkoseinän läpivirtausta n. 5%.



KUVIO 11. Ylimmän kerroksen ulosvirtauksen muutos

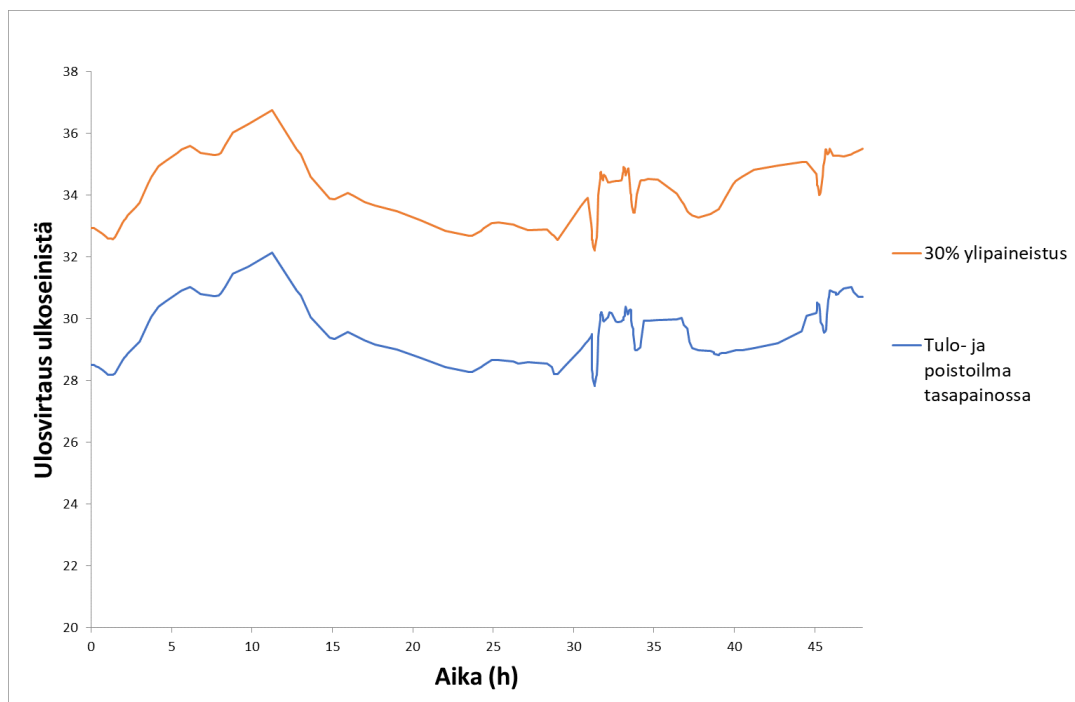
Kahden lämpöasteen nousu kuilussa aiheutti niin ikään ylipaineisuuden lisääntymisen ylimmässä kerroksessa noin viidellä prosentilla.

Seuraavaksi tarkkaillaan tilannetta, jossa huoneiston ilmavirrat on yläkerrassa ylipaineistettu 30% ja alakerrassa alipaineistettu 30%. Vastaava tilanne voi syntyä esimerkiksi huolimattomasta ilmanvaihdon säätötyöstä tai suunnittelusta.



KUVIO 12. Alimman kerroksen sisäänvirtauksen muutos ilmanvaihdon eri ase-
tuksilla

Simuloinnissa suoritettu paineistus nosti alimman kerroksen alipaineisuudesta
johtuvaa sisäänvirtausta jopa 15%. Vastaava nousu tapahtui ylipaineellisessa
yläkerrassa, kuten kuviosta 13 voidaan havaita.



KUVIO 13. Ylimmän kerroksen ulosvirtauksen muutos

6 POHDINTA

Termistä paine-eroa eli hormivaikutusta esiintyy Suomen oloissa etenkin talvella, kun sisä- ja ulkoilman välillä on suuri lämpötilaero. Vaikutus lisääntyy rakennuksen korkeuden ja lämpötilaeron suuruuden kasvaessa. Hormivaikutuksen mukana tulee useita haittatekijöitä liittyen asumisterveellisyyteen ja turvallisuuteen, kuten sisäilmaongelmia, kosteusongelmia ja energianhukkaa.

Hormivaikutus ja ilmanvaihto liittyvät vahvasti toisiinsa. Hormivaikutus voi vaikuttaa ilmanvaihdon toimintaan, ja toisaalta ilmanvaihdolla voidaan joko hallita tai vaikuttaa haitallisella tavalla rakennuksen painesuhteisiin. Siksi ilmanvaihdon suunnittelu vaatii suunnittelijalta kohteen ja olosuhteiden tuntemusta. Edellä mainitut seikat huomioon ottaen ohjeistusta ja säädöksiä hormivaikutuksen huomioimisesta löytyy hyvin vähän.

Tutkimuksessa tehtyjen kirjallisuusselvityksien, mittausten sekä simulointien pohjalta voidaan työhön liittyen todeta, että työn tulokset tukevat muissa tutkimuksissa, selvityksissä ja kirjallisuudessa saatuja tuloksia. Tehdyillä simuloinneilla havainnollistettiin porraskäytävän väärän lämpötilan ja ilmanvaihdon kehon tasapainotuksen aiheuttamaa vaikutusta rakennuksen painesuhteisiin. Jo kahden lämpöasteen nousu porraskäytävässä kiihdyttää hormivaikutusta niin, että simulointiolosuhteissa alakerran alipaineisuus ja yläkerran ylipaineisuus lisääntyi 5%. Myös ilmanvaihdon väärä säätö tai toteutus voi lisätä painesuhteiden aiheuttamaa harmia, kuten toisessa simuloinnissa havainnoitiin.

Kuusikerroksisen rakennuksen paine-eromittauksissa havaittiin, että mittausolosuhteissa ei saavutettu suurta muutosta ilmanvaihdon päätelaitteiden virtaamiin, vaikka hormivaikutus oli mittauksista havaittavissa. Tämä saattaa johtua useista eri tekijöistä tai niiden yhteisvaikutuksesta, esimerkiksi riittämättömästä lämpötilaerosta, vähäisestä korkeuserosta tai porraskuilun ja käytävän välisistä palovovista.

Työn luotettavuuteen etenkin mittausten osalta liittyy useita epävarmuustekijöitä. Voimakkaasti muuttuvia tuuliolosuhteita on haastavaa ottaa huomioon.

Myös rakennuksen ovien ja ikkunoiden avaaminen vaikuttaa paine-eromittaukseen. Simuloinneissa saavutetut tulokset riippuvat niin ikään useista tekijöistä, eikä vastaavia tuloksia välttämättä saataisi toisessa rakennuksessa. Esimerkiksi rakennuksen tiiveys vaikuttaa painesuhteisiin merkittävästi.

Aiheeseen liittyviä jatkotutkimuksia voisi tehdä pidemmän aikavälin mittauksin, jotta saataisiin tarkemmin selville termisen paine-eron vaikutus ilmanvaihdossa. Tutkimusta voisi myös tehdä asiantuntijahaastatteluin sekä tutustuen käytännön ratkaisuihin olemassa olevissa korkeissa rakennuksissa.

LÄHTEET

Aurola R. & Välikylä T. 2009. Asumisterveysopas. Ympäristö- ja terveys-lehti.

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

D2 Suomen Rakentamismääräyskokoelma. 2003. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Equa. 2020. Luettu 24.3. 2020. <https://www.equa.se/fi/>

Google maps. 2020. Luettu 27.3. 2020. <https://www.google.fi/maps>

Heikkinen J., Korkala T., Luoma M. & Salomaa H. 1987. Ilmanvaihtojärjestelmien virhetoiminnat ja häiriöalttius. Espoo: VTT.

Kuortti R. 2018. LVI-Tekniikka korkeassa asuinrakennuksessa. Talotekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Lee Joonghoon. 2012. E/V shaft cooling method as a stack effect countermeasure in tall buildings. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2268-ev-shaft-cooling-method-as-a-stack-effect-countermeasure-in-tall-buildings.pdf>

Nybergh C. 2014. Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa. Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Plescia S. 2013. Air leakage control in multi-unit residential buildings. <https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-air-leakage-control-in-large-res-buildings.pdf>

Ranta-aho I. 2016. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Sandberg E. 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Painos 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Seppänen K. 2010. Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli. Itä-Suomen yliopisto.

Seppänen O. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-kustannus Oy.

Seppänen O. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Helsinki: Sisäilmayhdistys ry.

Siikanen U. 2014. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Simmonds P. 2015. ASHRAE design guide for tall, supertall and megatall building systems. ASHRAE.

Sisäilmayhdistys - ilmavirtaukset rakennuksessa. 2008. Luettu 29.2.2020.
[https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekni-
nen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa](https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekni-
nen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa)

Sisäilmayhdistys – ulkoseinät. 2008. Luettu 1.3.2020. [https://www.sisailmayh-
distys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteusvaurioituminen/Ulkoseinat](https://www.sisailmayh-
distys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteusvaurioituminen/Ulkoseinat)

Talotekniikkainfo. 2019. Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas. Luettu 3.4. 2020.
<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>

Tuuliatlas. 2009. Tuulitiedot Suomen kartalla. Luettu 29.3.2020. [http://www.tuu-
liatlas.fi/fi/index.html](http://www.tuu-
liatlas.fi/fi/index.html)

Ympäristöministeriö ja rakennustieto Oy. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. 1009/2017

Ympäristöopas 2016. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö.