



Sääolojen vaikutus korkeiden rakennusten painesuhteisiin

Ilmanvaihtosuunnittelun näkökulma

Arttu Lindelä

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2022

Talotekniikan koulutusohjelma
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

LINDELÄ, ARTTU:

Sääolojen vaikutus korkeiden rakennusten painesuhteisiin
Ilmanvaihtosuunnittelun näkökulma

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Huhtikuu 2022

Uudisrakentamisen keskittyessä yhä vahvemmin suuriin asutuskeskuksiin tarve korkealle rakentamiselle kasvaa vuosi vuodelta. Maailmalla korkearakentamista käsitteleviä tutkimuksia on luotu jo pitkään, mutta suomenkielinen tutkimus on vielä verrattain vähäistä. Pohjolan vaihtelevat sääolot tuovat omat haasteensa korkeiden rakennusten suunnitteluun, joten kotimaiselle lisätutkimukselle on tilaa.

Tässä opinnäytetyössä on koottuna yhteen korkeiden rakennusten ilmanvaihtosuunnitteluun vaikuttavia asioita ja sen avulla luodaan pohjaa työn toimeksiantajan sisäiseen ohjeistukseen korkearakentamisen ilmanvaihtosuunnittelussa.

Työssä käsitellään sääolojen vaikutuksia korkeiden rakennusten painesuhteisiin ja sitä kautta sen ilmanvaihtojärjestelmään. Lämpötilaeron ja tuulen vaikutukset rakennuksen painesuhteisiin ja sen teknisiin järjestelmiin kasvavat rakennuksen korkeuden kasvaessa. Työssä tehdyt painesuhdetarkastelut toteutettiin IDA ICE -monivyöhykesimulaation avulla, johon mallinnettiin 16-kerroksinen asuinkerrostalo.

Työn tuloksena saatiin teoriaa tukevaa simulointidataa tuulen vaikutuksista rakennuksen painesuhteisiin. Simulointituloksista huomattiin, että simuloitu rakennus piti sisällään niin kutsuttuja asuntopareja, joiden paine-erovaihtelut ja ilmanvuotoarvot olivat lähellä toisiaan. Tutkimuksen avulla on mahdollista suorittaa lisätutkimusta paine-erojen vaikutuksista eri ilmanvaihtojärjestelmätyyppeihin.

Asiasanat: korkearakentaminen, painesuhdetarkastelu, ilmanvaihto, tuuli

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Building Services Engineering
HVAC Systems

LINDELÄ, ARTTU:
Effects of Changes in Weather Conditions on High-Rise Building
Perspective of Ventilation Design

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 0 pages
April 2022

As new construction is focusing more and more to the cities, the need for high-rise building increases every year. Global research on high-rise building has been active for a long time but in Finland it has been relatively scarce. Challenging weather conditions in Nordic countries make designing high-rise buildings more complicated.

The objective of this study was to gather the matters that affect designing ventilation system in high-rise buildings and to create a base internal guidance for the orderer of this research.

The study investigated how changing weather conditions effect to pressure ratio of high-rise buildings and their ventilation system. Increased height of a building increases the effects of wind and temperature differences on pressure ratio. Pressure ratio of a 16-story building was investigated using IDA ICE- simulation software.

The simulation results showed that wind and temperature differences affected the pressure ratio of the building as suggested in the theory part. As a result, it was found that the building has apartment pairs which have similar pressure ratios. Results enable further research of how wind affects to different ventilation system solutions.

Key words: high-rise building, pressure ratio, simulation, wind

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Tavoite ja tarkoitus	6
1.2	Määritelmä	6
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	8
2	ILMANVAIHTOSUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	9
2.1	Rakennuksen olosuhteet.....	9
2.2	Ilmanvuotoluku	10
2.3	Lämpötilaerojen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin	11
2.3.1	Hormivaikutuksen laskeminen	14
2.3.2	Rakenneosien aiheuttamat painehäviöt.....	15
2.4	Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin	16
2.4.1	Tuulen aiheuttaman paineen laskeminen	16
2.4.2	Tuulen nopeuden laskeminen	20
2.5	Yhteisvaikutuksen laskeminen	21
3	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN RATKAISUVAIHTOEHDOT	23
3.1	Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä	23
3.2	Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä	25
3.3	Vyöhykekohtainen ilmanvaihtojärjestelmä	27
4	HORMI- JA TUULISIMULOINNIT	29
4.1	Simulointimallin luominen.....	29
4.1.1	Simulointien lähtötiedot	31
4.1.2	Simulointimenetelmät	32
4.2	Hormisimuloinnit.....	33
4.3	Yhteisvaikutuksen simulointi	35
4.3.1	Paine-erot yhden kerroksen alueella	36
4.3.2	Yhden asuntolinjan väliset paine-erot.....	41
5	TUTKIMUSTULOSTEN YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	44
6	POHDINTA	47
	LÄHTEET.....	49

TERMISTÖ

Q_{50} Ilmanvuotoluku	Rakenteiden läpi vuotava ilmamäärä kun $\Delta P = 50 \text{ Pa}$
Hormivaikutus	Sisä- ja ulkolämpötilaeron aiheuttama ilmavirtaus
Neutraaliakseli	Kohta, jossa paine-ero rakennuksen ulkovaipan ylitse on nolla
TDC	Suhdeluku, joka kertoo rakennuksen ulkovaipan ylitse vallitsevan todellisen paine-eron ja laskennallisen hormivaikutuksen aiheuttaman paine-eron suhteen
Asuntolinja	Kerrostalossa päällekkäin sijaitsevat asunnot
ELA4	Luku, joka kertoo teoreettisen vuotoilma-aukon suuruuden oven läpi kun $\Delta P = 4 \text{ Pa}$
Lämmityskausi	Kausi, jolloin rakennuksen lämmitysjärjestelmä on käytössä säännöllisesti
Kosteuskonvektio	Ilmavirran mukana kulkevan vesihöyryn tiivistyminen rakenteisiin
AIVC	Kansainvälisen energijärjestön IEA:n sertifioima ilmanvaihtoon erikoistunut organisaatio
Peruskerros	Asuinkerrostalon kerros, joka toistuu samanlaisena useassa päällekkäisessä kerroksessa

1 JOHDANTO

1.1 Tavoite ja tarkoitus

Suomenkielinen tutkimus korkearakentamisen aiheuttamista haasteista on pientä verrattuna muuhun maailmaan. Vaihtelevat sääolot ja alati kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset aiheuttavat lisähaasteita Suomen uudisrakennusten suunnitteluun. Tämän opinnäytetyön päätavoitteena on tuoda esille huomioita ja ongelmakohtia korkeiden rakennusten ilmanvaihtojärjestelmää suunnitellessa sekä lisätä suomenkielistä tietämystä rakennuksen korkeuden vaikutuksista. Työ on tehty Rejlers Finland Oy:n toimeksiannosta ja se luo pohjaa yrityksen sisäiseen ohjeistukseen korkean rakennuksen ilmanvaihtosuunnittelussa.

Työssä tarkastellaan korkeiden asuin- ja toimistokerrostalojen ilmanvaihtosuunnitteluun vaikuttavia tekijöitä sekä vertaillaan erilaisten toteutustapojen ratkaisuja. Vertailun lisäksi työssä kiinnitetään erityistä huomiota rakennuksen korkeuden tuomiin haasteisiin painesuhteiden hallinnassa ja pyritään sitä kautta löytämään ongelmakohtia jo rakennushankkeen suunnitteluvaiheessa.

Työn tutkimusosuudessa käsitellään 16-kerroksisen asuinkerrostalon painesuhteita ja niiden vaikutuksia koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmään. Työssä vertaillaan myös koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon eri variaatioita, joita käsitellään tarkemmin teoriaosuudessa.

1.2 Määritelmä

Korkearakentaminen terminä on laaja-alainen ja sen määritelmä riippuu monesta eri tekijästä. Suomessakin määritelmiä on useita. Tampereen kaupungin korkean rakentamisen selvitys keskusta-alueella (vuodelta 2012) määrittelee, että korkearakentaminen kattaa yli 12 kerroksiset tai yli 35 metriin kohoavat rakennukset. Tämä määritelmä on luotu tutkimalla alueella jo olemassa olevan rakennuskannan peruskorkeutta ja vertailemalla sitä maailmalla sijaitsevien kaupunkien rakennuskantaan ja määritelmään korkeasta rakentamisesta (Korkean rakentamisen selvitys Tampereen keskusta-alueella 2012, 9).

Helsinki on maamme kaupungeista ainoa, jonka rakennusvalvontavirasto on julkaissut virallisen ohjekortin käsittämään nimenomaan korkearakentamista. Korkearakentamisen rakentamistapaohjekorteissa mainitaan useassa eri kohdassa korkean rakentamisen kattavan yli 16 kerroksiset rakennukset. (Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018).

Vantaan kaupunki on julkaissut oman selvityksensä korkearakentamisen tilasta vuonna 2020. Selvityksessä korkean rakennuksen statuksen saa yli 56 metrinen rakennus. Ympäristöministeriön asetuksen rakennusten paloturvallisuuden mukaan tiukimmat palomääräykset astuvat voimaan juuri 56 metrin kohdalla, joka on kaupungin selvityksen mukaan osaltaan vaikuttanut tämän rajapyykin muodostamiseen. (Korkearakentaminen Vantaalla 2020, 6–7). Taulukkoon 1 on koottu eri kaupunkien määritelmiä korkeasta rakentamisesta.

TAULUKKO 1. Korkearakentamisen määritelmä eri kaupungeissa.

Korkearakentamisen määritelmä kaupungeittain		
Kaupunki	Määräävä tekijä	Korkeus
Helsinki	Kerrosmäärä	16 krs.
Tampere	Kerrosmäärä/metrimäärä	12 krs/35 m
Vantaa	Metrimäärä	56 m

Taulukkoon 2 on listattu eri maiden korkeimpien rakennusten korkeudet sekä maan kymmenen korkeimman rakennuksen keskikorkeudet käyttäen apuna CTBUH:n karttapalvelua. Verrattaessa esimerkiksi Suomen 10 korkeimman rakennuksen keskiarvoa suurempien maiden vastaavaan lukuun, on selvää, että yhteisen määritelmän laatiminen globaalilla tasolla ei ole yksioikoista.

TAULUKKO 2. Korkeiden rakennusten vertailu maailmalla (CTBUH-karttapalvelu).

Korkearakentaminen maailmalla (sis. rakennusvaiheessa olevat asuin- ja toimistotalohankkeet)			
Maa	Korkein rakennus	Korkeus(m)	KA*(m)
Suomi	Majakka	131,7	89,1
Saudi-Arabia	Jeddah Tower	1000	398,6
Yhdysvallat	One WTC	541,3	437,6
Kiina	Shanghai Tower	632	532,4
Tanska	Lighthouse 2.0	142	110,1
Iso-Britannia	The Shard	306	236,2
*Maan 10 korkeimman rakennuksen keskikorkeus			

Talotekniikkainfon julkaisemassa suunnitteluohjeessa ”Tiiviiden asuinrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohje paine-erojen hallintaan” mainitaan, että yli 30 metrin korkuisissa tiloissa lämpötilaerojen aiheuttama paine-ero voi kasvaa hetkellisesti yli 50 Pascalin ylipaineeseen. 50 Pascalin paine-ero saattaa aiheuttaa vaaraa asukkaille vaikeuttaen ovien avaamista esimerkiksi evakuoititilanteessa. Tästä syystä yli 30 metrin korkuiset rakennukset luokitellaan paine-erosuunnittelun osalta vaativiksi kohteiksi. Ilmanvaihtosuunnittelun näkökulmasta korkearakentamisen määritelmä voidaan siis rajata alkamaan 30 metrin korkeudesta. (Talotekniikkainfo 2021a, 10)

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tämä opinnäytetyö toteutetaan laskennallisen ja vertailevan tutkimuksen yhdistelmänä. Laskennallisen tutkimuksen osuus toteutetaan Equa Simulation AB:n IDA-ICE simulointiohjelmalla, johon luodaan asuinkerrostalon rakennusmalli. Opinnäytetyöprosessin kannalta laskennallinen tutkimus antaa perspektiiviä rakennuksen olosuhteiden muutoksista eri tilanteissa ja sen avulla pyritään vahvistamaan kirjallisuusselvityksessä käsitellyjä asioita.

Simuloinnit toteutetaan kahdessa osiossa. Hormivaikutusta tutkitaan sisä- ja ulkoilmojen vakiolämpötilasimuloinneilla, jolloin siihen vaikuttavia lämpötilamuutoksia ei tapahdu. Tuulen vaikutuksia rakennukseen tarkastellaan simulointiohjelmaan ajatun Helsingissä mitatun säädätin avulla.

2 ILMANVAIHTOSUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

2.1 Rakennuksen olosuhteet

Niin terveydensuojelulaissa, työturvallisuuslaissa kuin maankäyttö- ja rakennuslaissakin on säädetty asuin- ja työolosuhteiden hallinnasta (Ympäristöopas 2016). Rakennustietokortiston ohjekortissa Sisäilmastoluokitus 2018 käsitellään nykyaikaisten tavoitetasojen pohjalta määritettyjen sisäilmaluokkien tavoitearvoja, joita noudattamalla rakennus täyttää nykyaikaiset lakiin kirjatut terveysvaatimukset. (Sisäilmastoluokitus 2018)

Sisäilmaston suunnittelusta ja kosteuden hallinnasta mainitaan Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017) seuraavasti:

Pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan on tehtävänsä mukaisesti rakennusta suunnitellessaan otettava huomioon seuraavat rakennuksen sisäilmastoon vaikuttavat tekijät:

- 1) sisäiset kuormitustekijät, kuten: lämpö- ja kosteuskuormitus, laitteet, valaistus, henkilökuormat, melulähteet, prosessit, rakennustuotteiden päästöt sekä muut rakennuksen käyttöön liittyvät epäpuhtaudet
- 2) ulkoiset kuormitustekijät, kuten: sää- ja ääniolot, ulkoilman laatu ja muut ympäristötekijät;
- 3) sijainti ja rakennuspaikka. (1009/2017 §8).

Sisäilman kosteuden on pysyttävä tilojen suunnitellun käyttötarkoituksen mukaisissa arvoissa sisäilman kosteudesta aiheutuvia kosteusvaurioita, mikrobien kasvua tai terveydellistä haittaa välttämällä. (1009/2017 §6).

Jos rakennuksen tilat ovat syystä tai toisesta ylipaineisia, on mahdollista, että sisäilman sisältämä vesihöyry kulkeutuu ilmavirtausten mukana rakenteiden läpi aiheuttaen kosteusvaurioriskin. Kosteusvaurioriski on suurimmillaan talvella, jol-

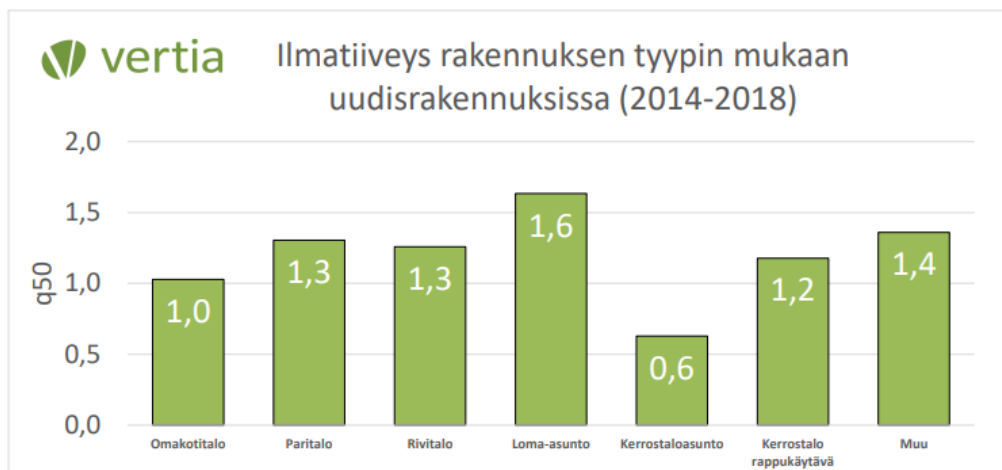
loin rakennuksen sisäilman ja ulkoilman lämpötilaerot ovat suurimmillaan ja lämmin sisäilma virtaa rakenteiden läpi. Ilmavirtauksen aiheuttamaa kosteuden kulkua kutsutaan kosteuskonvektioksi. Kosteuskonvektion aiheuttaman rakenteiden kostumisriskin minimoimiseksi rakennusten ilmanvaihtojärjestelmä tulisi pyrkiä pitämään tasapainossa ulkoilman paineeseen nähden. (Rakennusten kosteustekninen toimivuus YM 2020, 13)

2.2 Ilmanvuotoluku

Nykyaikaisen energiatehokkaan rakentamisen kolme avainasiaa ovat rakennuksen ilmatiiveys, hyvä ulkovaipan eristys sekä tehokas koneellisen ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmä. Rakennuksen ilmatiiveyttä mitataan ilmanvuotoluvulla q_{50} , joka kertoo rakenteiden läpi vuotavan ilmamäärän suhteutettuna ulkovaipan pinta-alaan paine-eron ollessa 50 Pa. Luvun yksikkö on m^3/m^2h . (Vertia Oy, Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2018, 3)

Vertia Oy:n (2018) tekemässä tutkimuksessa uusien rakennusten ilmatiiveydestä käsitellään eri rakennustyyppien ilmanvuotolukuja. Kuviossa 1 on esitetty keskimääräiset suuruusluokat ilmanvuotoluvuille. Voidaan todeta, että nykyajan kerrostalojen asunnot ovat huomattavasti tiiviimpiä verrattuna muihin talotyyppeihin. On kuitenkin muistettava, että rakennuksia tulee tarkastella kokonaisuuksina, jolloin asuinkerrostalon todellinen vuotoilmaluku on pelkkien asuntojen lukua suurempi. Koko asuinkerrostalon todellinen vuotoilmaluku on esitetty kuvion 1 palkissa ”kerrostalon rappukäytävä”, jolloin mittauksessa on otettu huomioon koko rakennuksen ilmanvuotoarvot. Kerrostalojen osalta tutkimus kattaa 74 kerrostaloa ja 914 kerrostaloasuntoa. (Vertia Oy, Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2018, 4)

Ilmanvuotoluvut



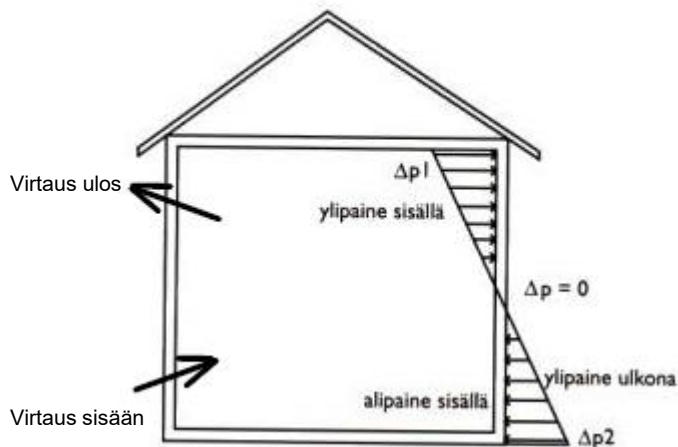
KUVIO 1. Ilmanvuotoluvut uudisrakennuksissa. (Vertia Oy, Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2018, 4)

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n julkaisemassa sisäilmaremontin loppuraportissa (2020, 1) Laine toteaa rakenneosien tiivistämisen täysin ilmatiiviiksi olevan lähes mahdotonta, esimerkiksi läpivientien ja elementtisaumojen osalta. Tästä syystä ne aiheuttavat ilmavuotoa rakennukseen ja ulkoilman välillä. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavia ulkoisia tekijöitä ovat tuuli ja lämpötilaerot ulkoviippan välillä. Koneellisen ilmanvaihdon lisäksi rakennuksen käyttötarkoitus ja käyttäjätottumukset tuovat taas ihmisen aiheuttamaa paine-eron vaihtelua sen sisätiloihin. (Laine 2020, 1)

2.3 Lämpötilaerojen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin

Ulko- ja sisäilman lämpötilaerot aiheuttavat korkeisiin rakennuksiin ilmavirtauksen, joka vaikuttaa sisätilojen painesuhteisiin. Ilman lämpötilan muuttuessa sen tiheys muuttuu ja se pyrkii liikkumaan pystysuuntaisessa vapaassa tilassa muodostaen virtauksen. Lämmityskaudella ulkoilman ollessa sisäilmaa kylmempää ylöspäin kohoava ilma luo alipaineen rakennuksen alaosaan ja vastaavasti ylipaineen sen yläosaan kuvion 2 tavoin. Tätä vaikutusta ja sen luomaa ilmavirtausta kutsutaan hormi- tai savupiippuvaikutukseksi. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016,118)

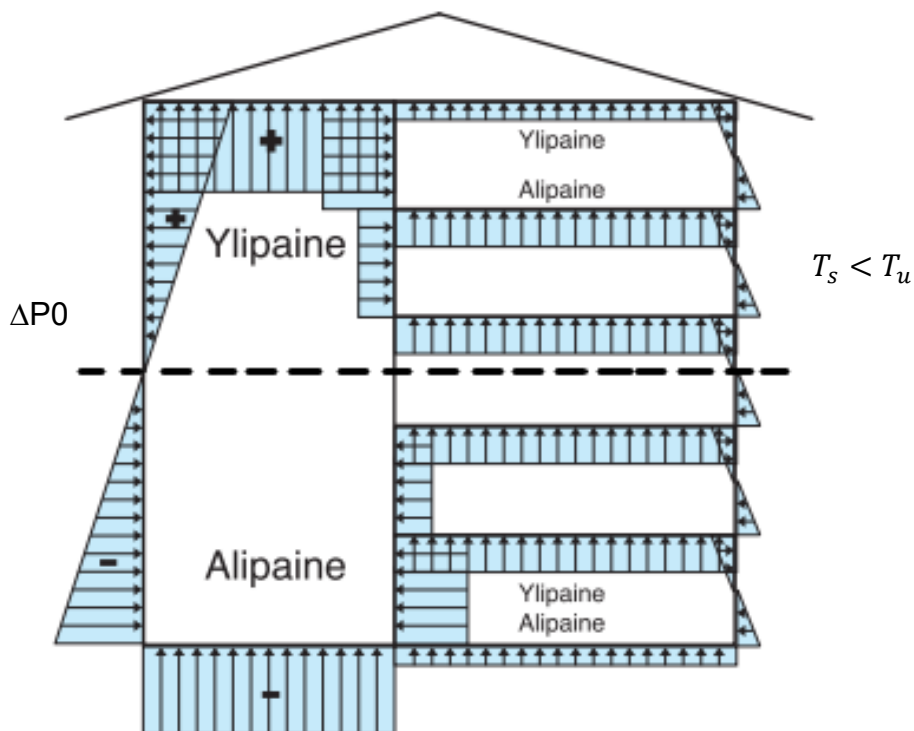
Jos tarkasteluun otetaan yksivyöhykkeinen tila, hormivaikutuksen esittäminen on helpompaa kuin kokonaista monivyöhykkeistä rakennusta tarkasteltaessa. Alla olevaan kuvioon on havainnollistettu kuinka paine-ero sisäilman ja ulkoilman välillä kasvaa vyöhykkeen korkeuden kasvaessa. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016,118)



KUVIO 2. Lämpötilaeron vaikutus yksivyöhykkeisen tilan painesuhteisiin. (Sisäilmayhdistys Ry, muokattu).

Kuviossa 3 kuvattu rakennus on jaettu kahteen osaan, jotta korkeiden kuilujen (esim. porras- ja hissikuilut) ja tiiviiden huoneistojen painesuhteita on helpompi havainnollistaa. Kuviota tutkiessa huomataan, että todellisuudessa asuinkerrosten osastointi korkeista kuiluista vaikuttaa painesuhteisiin niin kuiluissa, kuin asunnoissakin. Siitä voidaan todeta myös, että osastoinnit eivät ole ilmatiiviitä, sillä rakenteiden väliset raot vuotavat ilmaa joko kuilusta sisään ja ulkoseinästä ulos tai päinvastoin riippuen kerroksen sijainnista. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120)

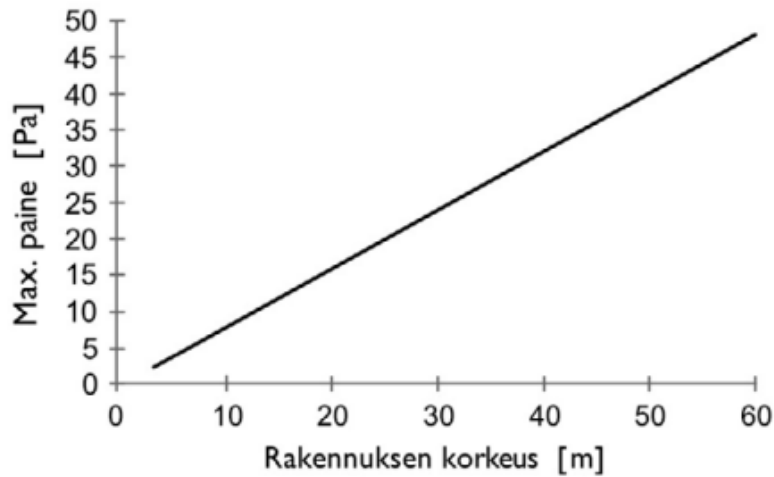
Savupiippuvaikutuksen ollessa voimakas se vaikuttaa merkittävästi rakennuksen painesuhteisiin. Tämä saattaa aiheuttaa ongelmia ilmanvaihtojärjestelmän toimintaan, jos hormivaikutusta ei ole osattu huomioida suunnitelmavaiheessa. Kun rakennuksen korkeus ylittää 20 m, rakennesuunnittelijan on kiinnitettävä erityistä huomiota välipohjalaattojen tiiveyttä ja korkeiden tilojen osastointeja suunniteltaessa. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120)



KUVIO 3. Lämpötilaeron aiheuttama paine-erojakauma rakennuksessa (Katto-liitto, Toimivat katot 2019, 15, muokattu).

Kuvion 3 mukaisesti lämpötilaeron aiheuttaman ulkovaipan yli vallitsevan paineeron neutraalitaso sijoittuu pystysuunnassa rakennuksen keskivaiheille. Neutraaliakselilla ulkovaipan ylitse vallitseva paine-ero on 0 Pa. Neutraaliakselin tarkkaan paikkaan vaikuttavat ulkovaipan vuotokohtien sijainti ja vuotoilmamäärät. Esimerkiksi oven tai ikkunan avaaminen muuttaa neutraaliakselin paikkaa avatun aukon suuntaan. Näiden tekijöiden vaikutukset ovat rakennuskohtaisia, joten neutraaliakselin paikan määrittäminen laskennallisesti rakennuksessa on mahdotonta. Neutraaliakselin oletetun paikan määrittäminen toteutetaan painemittausten avulla. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 120)

Kuviossa 4 on havainnollistettu tarkemmin, miten rakennuksen korkeus vaikuttaa sen yläosan ylipaineisuuteen lämpötilaeron ollessa 20 C. Kuvioista 3 ja 4 nähdään, että paine-ero rakennuksen sisällä kasvaa lineaarisesti korkeuserojen kasvaessa. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 121)



KUVIO 4. Hormivaikutuksen aiheuttama ylipaine korkeuden suhteen ulko- ja sisäilman lämpötilaeron ollessa 20 C. (Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, 121)

2.3.1 Hormivaikutuksen laskeminen

Hormivaikutus aiheuttaa muutoksia rakennuksen painesuhteisiin ja siten se vaikuttaa myös ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirtoihin. Lämpötilaeron aiheuttama paine-ero (Pa) avoimessa yksivyöhykkeisessä tilassa saadaan laskettua kaavan 1 avulla. (Sandberg 2016a,107)

$$\Delta p_h = \left(\frac{T_s - T_u}{T_u} \right) \rho_s g h \quad (1)$$

, jossa

Δp_h = tilan ala- ja yläosan paine-ero (Pa)

T_s = sisäilman absoluuttinen lämpötila (K)

T_u = ulkoilman absoluuttinen lämpötila (K)

ρ_s = sisäilman tiheys (kg/m³)

g = putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s²)

h = avoimen tilan korkeus (m). (Sandberg 2016a,107)

Kaavalla 1 saadaan laskettua yksivyöhykkeisen tilan eli esimerkiksi hissikuilun teoreettisen paine-eron. Kun tarkastellaan monivyöhykkeistä rakennusta asia ei ole niin suoraviivainen. Todellisen paine-eron suuruuteen vaikuttaa rakennuksen osastoinnin sekä ulkovaipan tiiveys. Käytännössä hormivaikutuksen synnyttämät paine-erot rakennuksen sisällä tasaantuvat, kun hissikuilussa syntyvä paine pääsee vuotamaan ulkoseinien ja aukkojen kautta. (Ashrae 2017, 16.7)

2.3.2 Rakenneosien aiheuttamat painehäviöt

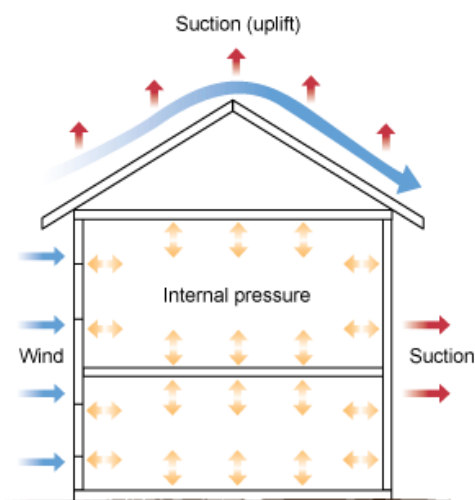
Ylempänä havainnollistettiin, kuinka hormivaikutuksen aiheuttamat ilmavirtaukset rakennuksen kuiluissa virtaavat rakenteiden läpi. Hormivaikutuksesta syntynyt paine-ero pienenee ilman virratessa rakennuksen sisäisten vuotoilmareittien läpi. Tämä johtuu vuotoilmareittien aiheuttamasta painehäviöstä. Paine-ero kuilun ylä- ja alaosassa ei siis vastaa rakennuksen ulkovaipan ylitse vallitsevaa paine-eroa. (Ashrae 2017, 16.10)

Rakennuksen ulkovaipan ylitse vallitseva todellinen paine-ero jaettuna hormivaikutuksen aiheuttamalla laskennallisella paine-erolla ilmoitetaan TDC-lukuna (Thermal Draft Coefficient), jota käytetään kertoimena kaavassa 5. Luvun suuruuteen vaikuttaa rakennuksen sisäisten vuotoilmareittien aiheuttamat painehäviöt, jotka käytännössä tarkoittavat rakennuksen sisäisten elementtisaumojen sekä ovien ja läpivientien tiiveyttä. (Ashrae 2017, 16.10)

60-luvulla tehty tutkimus korkeiden toimistorakennusten paine-eroista osoittaa, että TDC-luku oli tuolloin 0.8 ja 0.9 välillä. Luvun ollessa 0.8 rakennuksen ylä- ja alaosan laskennallisen hormivaikutuksen aiheuttamasta paine-erosta vain 80 % vaikuttaa sen ulkovaipan ylitse. Jos rakennus olisi yksivyöhykkeinen, eikä sisäisiä virtausvastuksia rakennuksen elementeistä syntyisi, olisi TDC-luku tällöin 1. (Ashrae 2017, 16.10)

2.4 Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin

Tuuli vaikuttaa rakennuksen painesuhteisiin yhdessä lämpötilaeron kanssa. Tuulen aiheuttaman painesuhteiden vaihtelun suuruuteen vaikuttaa merkittävästi tuulen nopeus, tuulen tulokulma rakennuksen seiniin nähden, pinnanmuodot, ympäröivät rakennukset sekä rakennuksen muoto. Tuulen osuessa rakennukseen se luo ylipaineen tuulen puoleiselle seinälle ja vastaavasti alipaineen suojanpuoleiselle seinälle kuvion 5 tavoin. (Ashrae 2017, 16.7)



KUVIO 5. Tuulen vaikutus rakennukseen. (CEF, 2017)

2.4.1 Tuulen aiheuttaman paineen laskeminen

Tuulen synnyttämä staattinen paine rakennuksen ulkovaipalla on lähes suoraan verrannollinen vapaasti virtaavan tuulen luomaan paineeseen. Tuulen aiheuttama staattinen paine rakennuksen ulkovaipalle voidaan siten arvioida laskennallisesti käyttämällä kaavaa 2, joka on johdettu Bernoullin-yhtälöstä. (Ashrae 2017, 16.7)

$$P_w = C_p \rho \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

, jossa

P_w = vapaasti virtaavan tuulen aiheuttama paine (Pa)

ρ_s = ulkoilman tiheys (kg/m³)

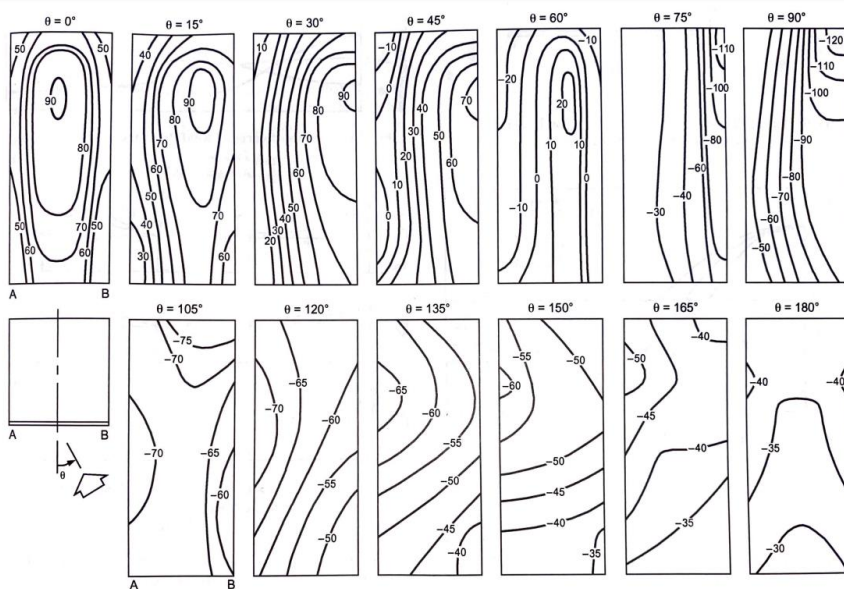
V = tuulen nopeus (m/s)

C_p = korjauskerroin.

Rakennuksen muoto, tuulen suunta sekä viereisten rakennusten ja pinnanmuotojen aiheuttamat muutokset tuulen virtaussuunnalle ja painetasoille vaikuttavat korjauskertoimen suuruuteen. Kaavassa korjauskertoimena C_p käytetään lukua, joka voidaan tarkkaan määrittää vain tuulitunnelitestien avulla. (Ashrae 2017, 24.5)

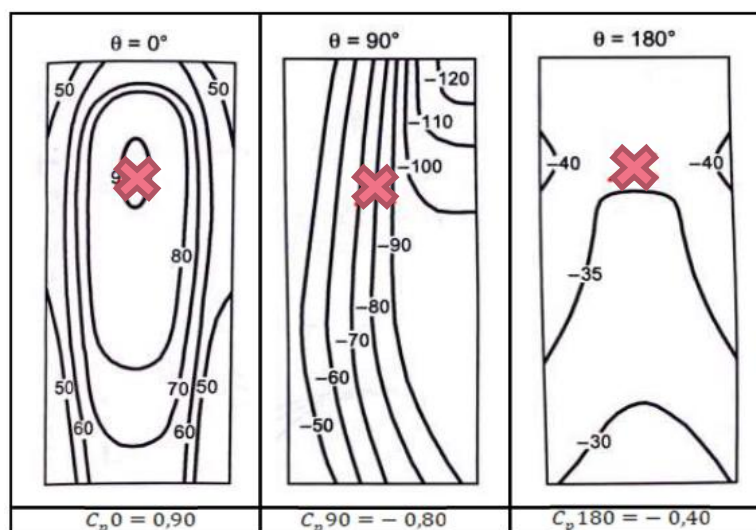
Jo olemassa olevaa tuulitunnelitestien perusteella kerättyä dataa voidaan käyttää hyväksi tehtäessä laskennallista arviota neliskulmaisen rakennuksen painesuhteista. Kuviossa 6 on esitetty miten tuulen suunta vaikuttaa korkean rakennuksen seinälle syntyvään paineeseen kaupunkiympäristössä. Siinä esitetyt korjauskertoimet on määritetty tuulitunnelimittausten avulla. Korjauskertoimet ovat päteviä sellaiseen rakennukseen, jonka julkisivu on vähintään kolme kertaa rakennuksen leveyden mittainen. Kuviossa ilmoitetut luvut on esitetty ($C_p \times 100$), jolloin oikea korjauskerroin saadaan jakamalla siinä näkyvät luvut 100:lla. (Ashrae 2017, 24.5)

Kuviossa 6 näkyvät nelikulmiot kuvaavat rakennuksen julkisivua ja niiden yläpuolelle merkityt kulmat kertovat tuulen tulokulman kyseiselle seinustalle. Seinusta, johon tuuli osuu oikokulmassa, on siis tuulen vastainen seinusta, jolloin siihen vaikuttaa alipaine kuvion 5 mukaisesti.

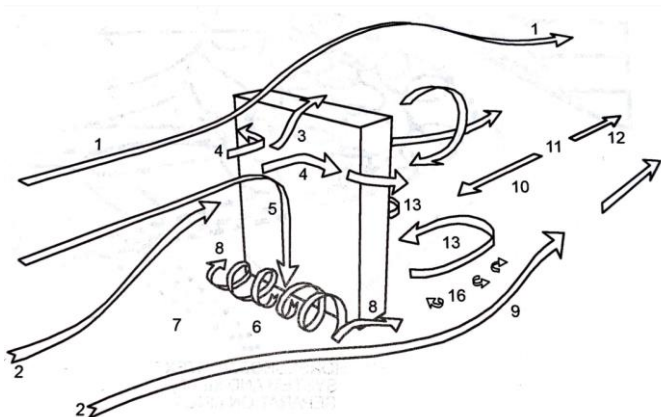


KUVIO 6. Tuulen suunnan vaikutus korjauskertoimiin korkean rakennuksen seinällä. (Ashrae 2017, 24.5).

Alla olevaan kuvioon 7 on laskettuna muutamia korjauskertoimia eri seinustoille. Kuviossa 7 esiintyvät korjauskertoimet on laskettu jakamalla kuvion 6 korjauskertoimet sadalla. Laskettavien pisteiden kohdat rakennusten seinustoilla on merkitty kuvioon 6 ristein. Laskettujen korjauskerrointen perusteella ne ovat suurimmillaan tuulen osuessa kohtisuoraa rakennuksen julkisivuun ja pienimmillään tuulensuuntaisen seinustan yläosissa, jossa $C_p \min = -1.2$. Ashrae:n käyttämät arvot kuvion 6 korjauskertoimille on määritetty vuonna 1982 tehdyn tutkimuksen perusteella (Ashrae 2017, 24.5)

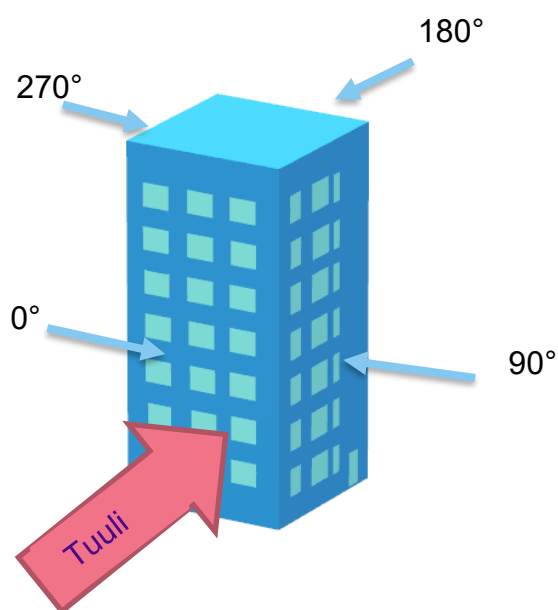


KUVIO 7. Korjauskertoimia rakennuksen julkisivujen eri kohdissa.



KUVA 1. Tuulen käyttäytyminen rakennuksen ympärillä. (Ashrae 2017, 24.1).

Tuulen käyttäytymistä rakennuksen ympäristössä on kuvattu tarkemmin kuvassa 1. Tuulen osuessa rakennuksen seinustalle se käyttäytyy yllä olevan kuvan tapaan luoden alipaineen pyörteen 8 takia rakennuksen etuseinän alaosaan ja tuulen viereisille sivuille. Kuvaan merkityt virtausnuolet 4 ja 5 taas aiheuttavat ylipaineen rakennuksen seinustalle. Tuulen suuntaa rakennuksen seinustan suhteen on havainnollistettu kuvalla 2, jossa tuulen tulosuunta on kuvattu punaisella nuolella. Rakennuksen ulkoseinien kulma tuuleen nähden on merkitty kuvan jokaiselle seinustalle.



KUVA 2. Tuulen tulokulma rakennuksen julkisivuihin nähden.

2.4.2 Tuulen nopeuden laskeminen

Jotta tuulen aiheuttamaa paineen vaikutusta voidaan arvioida, on pystyttävä selvittämään tuulen laskennallinen nopeus rakennuksen seinustalla. Tuulen nopeus riippuu mittauspisteen korkeudesta. Ashrae:n mukaan tuulen nopeus rakennuksen räystäään korkeudella voidaan arvioida kaavaan 3 avulla. (Ashrae 2017, 24.4)

$$V_H = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \quad (3)$$

, jossa

V_H = Laskentapisteen arvioitu tuulennopeus (m/s)

V_{met} = sääasemalla mitattu tuulennopeus (m/s)

δ_{met} = sääaseman korkeuden korjauskerroin (m)

a_{met} = sääaseman ympäristön korjauskerroin

H_{met} = sääaseman mittauskorkeus (m)

δ = laskentapisteen korkeuden korjauskerroin (m)

a = laskentapisteen ympäristön korjauskerroin

H = laskentapisteen korkeus (m).

Kaavassa 3 V_{met} on sääasemalla mitattu tuulennopeus, jota kerrotaan laskentapisteen ympäristön- ja korkeuden korjauskertoimilla. Korjauskertoimet ovat mitaustulosten perusteella laadittuja kokemusperäisiä arvioita ja ne on esitetty taulukossa 3. (Ashrae 2017, 24.4)

TAULUKKO 3. Tuulen nopeuden laskennassa käytettävät korjauskertoimet. (Ashrae 2017, 24.4, muokattu)

Ympäristön tunnus	Ympäristön kuvaus	Korjauskerroin a ja a_{met}	Korkeuskerroin $\delta(m)$
1	Taajamat, jossa valtaosa rakennuksista yli 25 m korkeita. Esim. Kaupunkien keskustat.	0.33	460
2	Matalat asutusalueet ja rakennettu ympäristö. Esim. omakotitaloalueet.	0.22	370
3	Avoimet alueet, jossa hajanaisia rakennuksia. Esim. sääaseman läheisyys tai pellot.	0.14	270
4	Avoimet alueet, jossa tasaista yli 1,6 km suuntaansa. Esim. merialueet.	0.10	210

2.5 Yhteisvaikutuksen laskeminen

Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat ulko- ja sisäilman lämpötilaerot sekä julkisivuun osuvan tuulen suunta ja nopeus. Aiemmin mainittujen tekijöiden lisäksi myös tekniset järjestelmät vaikuttavat rakennuksen sisäisiin painesuhteisiin. Teknisillä järjestelmillä tarkoitetaan tässä tapauksessa ilmanvaihtojärjestelmää. (Ashrae 2017, 16.9)

Kaavan 4 avulla voidaan laskea kaikkien näiden ulkoisten tekijöiden yhteisvaikutus, kun tarkastellaan rakennuksen painesuhteita. Kaava 4 on muodostettu yhdistämällä kaavat 1 ja 2. (Ashrae 2017, 16.9)

$$P_{tot} = \Delta p_h \cdot TDC + P_w + P_t \quad (4)$$

jossa

P_{tot} = Yhteisvaikutuksesta syntyvä paine-ero (Pa)

Δp_h = Lämpötilaeron aiheuttama paine-ero (Pa)

TDC = Terminen virtauskerroin

P_w = Tuulen aiheuttama paine-ero (Pa)

P_t = Teknisten järjestelmien aiheuttama paine-ero (Pa). (Ashrae 2017, 16.9)

Suomessa ilmanvaihtojärjestelmä pyritään suunnittelemaan ja säätämään tasapainoon, jolloin teknisten järjestelmien vaikutus rakennuksen painesuhteisiin minimoidaan. Tämän vuoksi teknisten järjestelmien vaikutus voidaan jättää huomioidatta yhteisvaikutusta laskettaessa johtamalla kaava 5 kaavasta 4.

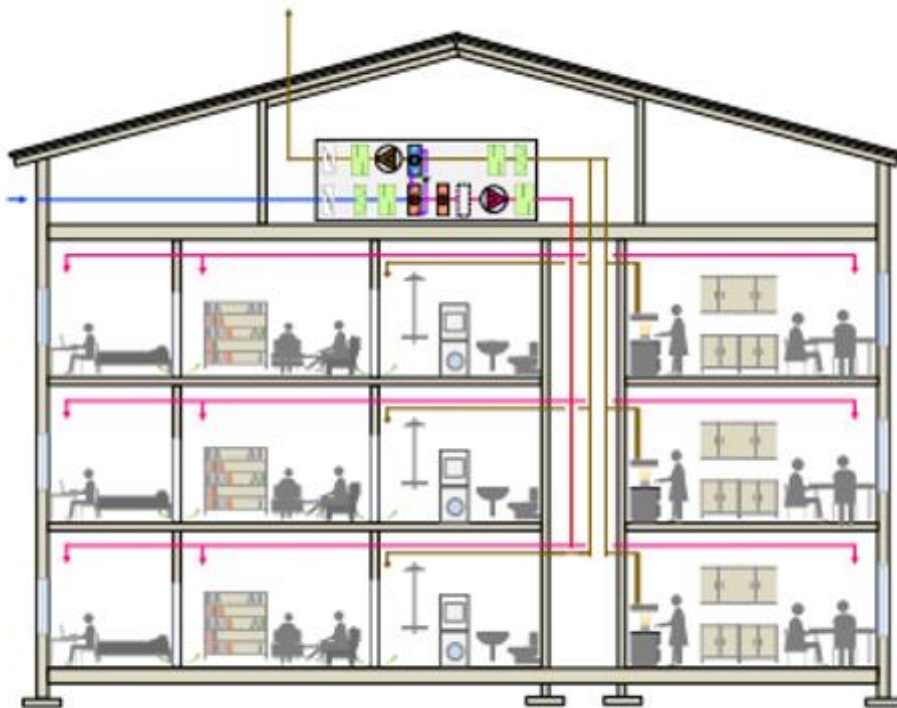
$$P_{tot} = \Delta p_h \cdot TDC + P_w \quad (5)$$

3 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN RATKAISUVAIHTOEHDOT

3.1 Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä

Keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä on nimensä mukaan rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä, jonka toiminta on keskitetty koko rakennuksen alueelle. Tämä tarkoittaa, että yhdellä ilmanvaihtokoneella hallitaan usean kerroksen asuintilojen ilmanvaihtoa. Joissain tapauksissa asuintilojen ilmanvaihto voidaan toteuttaa useammalla koneella samalla periaatteella kuin yhden koneen järjestelmissä jakamalla rakennus esimerkiksi kahteen vyöhykkeeseen horisontaalisesti. (Sandberg 2016b,123)

Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokone sijaitsee yleensä rakennuksen yläosassa, josta runkokanavistot johdetaan hormoneihin. Hormit suunnitellaan siten, että jokaisella asuntolinjalla on omat tulo- ja poistoilmarunkokanavat, joihin asunnon kanavistot liitetään. Asuntolinjalla tarkoitetaan kerrostalossa päällekkäin olevien asuntojen muodostamaa ”linjaa”. Kuvassa 3 on esitetty keskitetyn järjestelmän toimintaperiaate pääpiirteittäin. (Sandberg 2016b,123)



KUVA 3. Yhteisellä säädöllä toteutettu keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä pääpiirteittäin. (Sandberg 2016b,124)

Kun suunnittelupöydälle otetaan korkea asuinkerrostalo ja asuinhuoneistojen ja -kerrosten lukumäärä kasvaa suureksi, on kohteeseen tehtävä vyöhykejako. Kerrosten lisääntyessä asuntojen määrä ja järjestelmän kokonaisilmamäärät kasvavat. Tällöin yhden koneen kanavisto kasvaa liian suureksi, eikä kanavistoa pystytä enää järkevästi säätämään. Vyöhykejako tehdään kerroksittain siten, että yksi ilmanvaihtokone palvelee 6–8 asuinkerrosta, jolloin säädettävyys verkostossa säilyy. (Lehtinen, Mikael, 2022, asiantuntijahaastattelu)

Suurissa kohteissa iv-koneiden sijoittelua mietittäessä rajoittavaksi tekijäksi nousee yleensä palon- ja savunhallinnan näkökulma. Lähtökohtaisesti näiden tekijöiden takia iv-koneen tulisi aina sijaita palvelemaansa alueen yläpuolella, jotta lisäkustannuksilta vältyttäisiin. (Lehtinen 2022)

Jos toteutetaan esimerkiksi 12-kerroksisen kohteen ilmanvaihtojärjestelmää, jaetaan rakennus esimerkiksi 6-kerroksen korkuisiin vyöhykkeisiin ja sijoitetaan molemmat koneet vesikatolla sijaitsevaan konehuoneeseen. Tämä aiheuttaa sen, että ylhäältä katsottuna ensimmäisen kuuden kerroksen alueella kulkee kaksinkertainen määrä hormeja verrattuna alempiin kerroksiin. (Lehtinen 2022)

Keskitetyn ilmanvaihdon säätäminen on mahdollista kahdella eri tapaa. Ensimmäinen keino on varustaa järjestelmä yhteisellä säätimellä, joka säädetään vakioilmavirtaan. Huoneistoissa ei näin ollen ole omia, asukkaan käytössä olevia ilmapirtasäätimiä. (Sandberg 2016b,123)

Toinen keino on varustaa huoneistot omilla säätimillä, joita asukas voi säätää tarpeen mukaan esim. ruoanlaiton tai saunomisen aikaan. Tarpeenmukaisen järjestelmän säätäminen tapahtuu yleensä liesikuvulta, jolla ohjataan poisto- ja tulo-kanavistojen ilmamääräsäätimiä. Tehostuskanavisto voidaan toteuttaa joko erillisenä kanavistona tai se voidaan liittää normaaliajan kanavistoon. (Sandberg 2016b,123)

Luvun 2.3 mukaan rakennuksen paine-erot ulkovaipan ylitse muuttuvat korkeuden mukaan. Tämä aiheuttaa sisäisiä muutoksia rakennuksen painesuhteisiin,

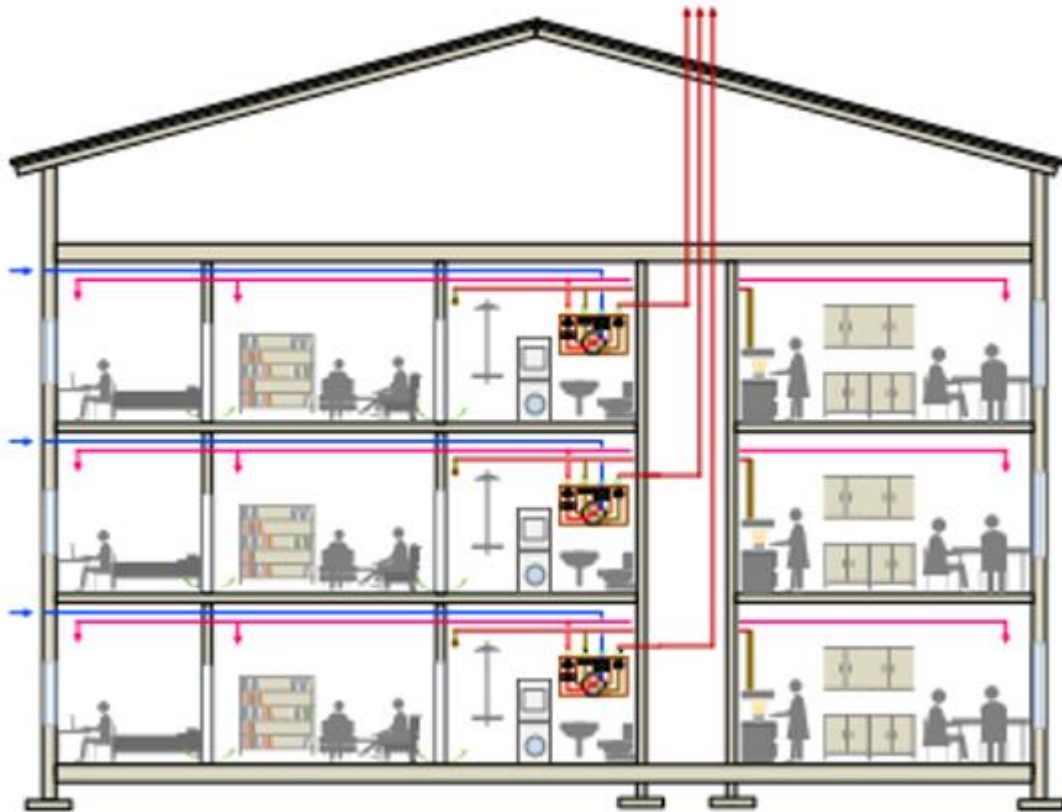
joka vaikeuttaa säätöitä. Myös luvussa 2.4 käsiteltävä tuulen vaikutus rakennuksen paine-eroihin aiheuttaa säätöihin hankaluuksia, sillä keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokone palvelee samaan aikaan useaa ulkoseinustalla olevaa huoneistoa. Kuvan 1 perusteella voidaan päätellä, että tuulen osuessa rakennuksen seinään osa rakennuksen julkisivusta ylipaineistuu. Samaa aikaan osa julkisivusta alipaineistuu ja tämä aiheuttaa ongelmia verkoston säätämiseen tasapainoiseksi.

Valittaessa keskitetty järjestelmä korkeaan kohteeseen, ilmanvaihtokoneiden määrä pysyy maltillisena ja huolto- sekä elinkaarikustannuksissa säästetään. (Lehtinen 2022). Muihin järjestelmäratkaisuihin verrattuna iv-konemäärä on varsinkin korkeiden rakennusten kohdalla huomattavasti pienempi. Järjestelmän huoltotarve kohdistuu keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä konehuoneeseen sekä pystyhormeihin, jolloin asuntokohtaisia huoltotoimenpiteitä ei tarvitse suorittaa. (FläktGroup 2021a)

Muihin ilmanvaihtoratkaisuihin verrattuna keskitetty järjestelmä on hiljainen, sillä puhaltimet ja suurimmat äänilähteet sijaitsevat kaukana asuntojen kanavistoista. Tuloilman jäähdytys kesähelteillä toteutetaan koneen jäähdytyspatterilla, jolloin se mahdollistaa viilennyksen huoneistoihin ilman erillisiä jäähdytyskoneita. (FläktGroup 2021a)

3.2 Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä

Hajautetulla ilmanvaihtojärjestelmällä tarkoitetaan asuinkerrostalossa huoneistokohtaisen järjestelmän toteuttamista pientalon tyyliin. Huoneiston kanavointi toteutetaan käytännössä samalla tavalla kuin keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä, mutta hormiin liittymisen sijaan jokaiseen huoneistoon asennetaan oma ilmanvaihtokone. Kuvassa 4 on huoneistokohtainen järjestelmä, jossa jäteilmäratkaisu on toteutettu johtamalla jäteilma vesikatolle erilliskanavin. (Sandberg 2016b,125)



KUVA 4. Huoneistokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä asuinkerrostalossa. (Sandberg 2016b,125)

Hormivaikutuksesta aiheutuvat paine-erot saadaan minimoitua huoneistokohtaisessa järjestelmässä iv-koneen palvellessa vain yhden kerroksen korkuisella alueella. Tämän Lehtinen (2022) mainitsee suureksi eduksi järjestelmän säätöä ajatellen. Myös tuulesta aiheutuvat painesuhteiden muutokset vaikuttavat vain yhden huoneiston alueelle. Sääolosuhteista johtuviin painenvaihteluun on helpompi reagoida, kun jokaisen yksikön automaatio pyrkii pitämään oman palvelualueensa tasapainossa.

Huoneistokohtaista ilmanvaihtojärjestelmää suunniteltaessa on tarpeen miettiä ulospuhalluslaitteiden sijaintia. Jos jokaisen huoneiston jäteilma johdetaan rakennuksen vesikatolle, tarvitaan hormitilaa jäteilmakanaville. Huoneistojen jäteilmat on mahdollista yhdistää nk. kokoojakanavaan, joka alipaineistetaan, jotta huoneistojen väliseltä ilmojen sekoittumiselta vältytään (Sandberg 2016b,125).

Asuinhuoneiston poistoilmaluokka on normaalisti luokassa 3, jolloin jäteilma on mahdollista johtaa ulos myös suoraan ulkoseinästä (Talotekniikkainfo 2021c)

Raitisilmakanavisto otetaan lähtökohtaisesti aina huoneiston ulkoseinältä. Katutasossa sijaitsevien huoneistojen ilmanottolaitteiden sijoittelua tulee kuitenkin tarkastella lähemmin, jos laitteen läheisyydessä kulkee esimerkiksi vilkas katu. (Sandberg 2016b,125).

Yleisen asumisviihtyvyyden parantaminen on yksi syy huoneistokohtaisen ilmanvaihtojärjestelmän valinnalle rakennuksiin. Lehtinen kuitenkin mainitsee haastattelussaan huoneistokohtaisen ilmanvaihdon olevan toteutustavoista äänekkäin äänilähteen eli ilmanvaihtokoneen sijaitessa yleensä huoneiston kylpyhuoneessa. Ilmanvaihtokoneen palvellessa ainoastaan yhtä huoneistoa, asukkaan on mahdollista vaikuttaa oman kotinsa ilmanvaihtoon sekoittamatta muiden samassa talossa asuvien ilmavirtoihin ja sisäilmaoloihin. Oikeaoppisella käytöllä asuntokohtaisella järjestelmällä voidaan säästää suuria määriä energiaa säättämällä ilmamääriä pienemmäksi esim. lomamatkan ajaksi. (Fläktgroup 2021b)

Suuret kohteet (yli 12-kerroksiset asuintalot) saattavat pitää sisällään helposti yli 100 asuinhuoneistoa. Kun jokaiseen huoneistoon asennetaan oma koneensa huoltokuorma kasvaa todella suureksi verrattuna keskitettyyn järjestelmään. Vaikka jokaisen huoneiston kone toimii oman automatiikan avulla, on yhteisen tietoväylän luominen koneiden välille lähes välttämättömyys, jotta vian paikantaminen on mahdollista Lehtinen muistuttaa. (Lehtinen 2022)

3.3 Vyöhykekohtainen ilmanvaihtojärjestelmä

Kahden edellä mainitun järjestelmävaihtoehdon yhdistelmää kutsutaan vyöhyke- tai kerroskohtaiseksi ilmanvaihtojärjestelmäksi. Vyöhykekohtaisessa järjestelmässä yksi ilmanvaihtokone palvelee keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän tapaan useaa asuinhuoneistoa kerrallaan. Tätä järjestelmää kutsutaan usein kerroskohtaiseksi järjestelmäksi, sillä sen toiminta-alue on yleensä yhden tai vaihtoehtoisesti kahden asuinkerroksen kokoinen. (Fläktgroup 2021c)

Vyöhykkeittäin asennettavat ilmanvaihtokoneet tarvitsevat teknisen tilan omalta palvelualueeltaan, jolloin erillisen konehuoneen tarve vesikatolta poistuu. Pys-

tyhormeja tulo- ja poistokanavistoihin ei keskitetyn järjestelmän tapaan tarvita koneiden sijaitessa palvelualueensa korkeudella. Vyöhykekohtaisessa järjestelmässä iv -koneet sijaitsevat jaottelusta riippuen jokaisessa tai joka toisessa kerroksessa. Korkean rakennuksen ilmanvaihtoratkaisuna vyöhykekohtainen järjestelmä vaatii siis moninkertaisen määrän koneita keskitettyyn järjestelmään verrattuna. (Lehtinen 2022). Ilmavirtojen säätö vyöhykekohtaisessa järjestelmässä tapahtuu saman kaltaisesti kuin keskitetyssä järjestelmässä. (Fläktgroup 2021c)

Myös kerroskohtaisen järjestelmän iv-koneen toiminta-alue on vain yhden tai kahden kerroksen korkuinen. Tästä johtuen vyöhykekohtaisen järjestelmän säätäminen on helpompaa verrattuna keskitettyyn järjestelmään. (Lehtinen 2022)

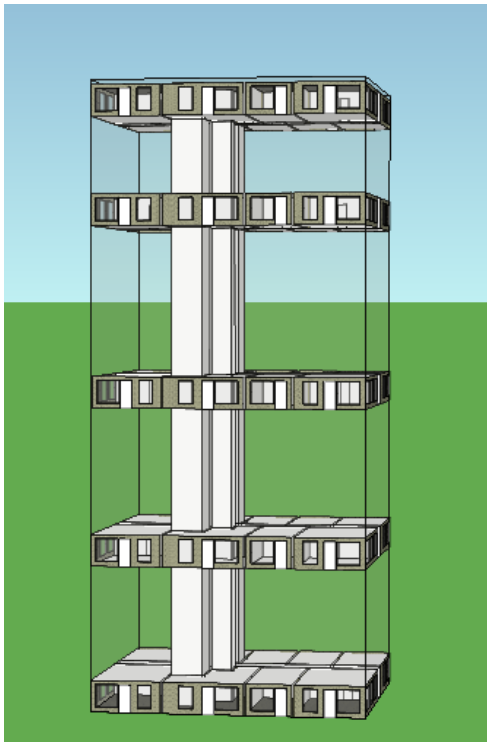
Kerroskohtaisessa järjestelmässä koneen ulkoilma otetaan jokaiseen kerrokseen rakennuksen julkisivulta. Jäteilmaratkaisut toteutetaan samalla periaatteella kuin huoneistokohtaisessa järjestelmässä. Ulospuhallus sijoitetaan joko erikoisluvalla julkisivuun tai kuljetetaan jäteilmakanavassa katolle. (Fläktgroup 2021c)

4 HORMI- JA TUULISIMULOINNIT

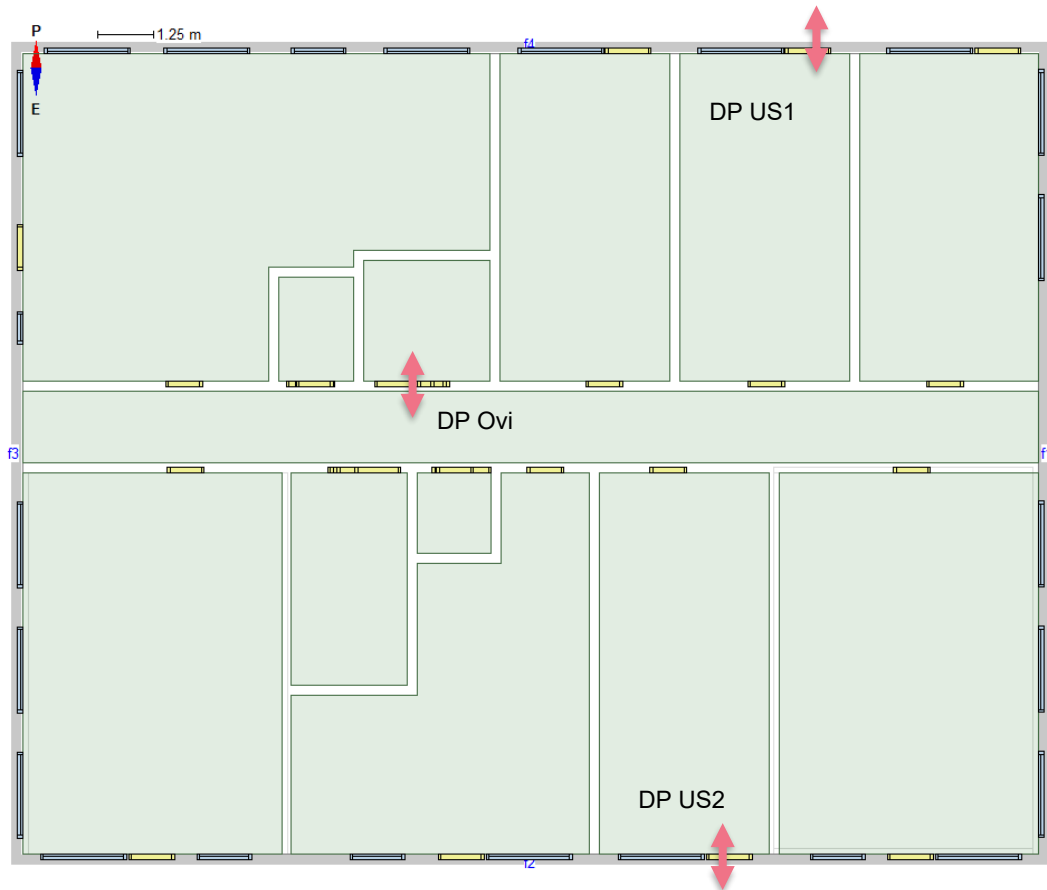
4.1 Simulointimallin luominen

Luvussa 2 käsitellyjä rakennuksen ulkopuolisia vaikutuksia sen painesuhteisiin voidaan tutkia laskennallisesti. Tässä työssä käytettävä IDA ICE -ohjelmisto on laskentaohjelma, jonka avulla voidaan simuloida rakennuksen ilmavirtojen sekä paine-erojen lisäksi esimerkiksi energiankulutusta.

Kuvassa 5 on simulointeja varten luotu monivyöhykemalli, joka on 17-kerroksinen asuinkerrostalo. Sen niin kutsuttu peruskerros koostuu kahdeksasta asuinhuoneistosta. Rakennuksessa on kaksi hissiä sekä kaksi porrashuonetta, jotka näkyvät pohjakuvassa 6 käytävän molemmin puolin. Ensimmäisen simuloidun kerroksen ja ylimmän kerroksen lattiapintojen korkeusero on 48 metriä kerroskorkeuden ollessa 3 metriä.



KUVA 5. IDA-ICE simulointimalli rakennuksesta.



KUVA 6. Simulointimallin pohjapiirustus.

Näiden simulointien tarkoituksena on osoittaa lämpötilaerojen vaikutuksia eri korkeuksissa rakennusta, joten jokaisen kerroksen mallintaminen ja tutkiminen ei tuo merkittävää lisähyötyä lopulliseen analyysiin. Simulointimallia katsottaessa voidaan todeta, että monivyöhykemalliin on luotu ainoastaan osa kerroksista, joka nopeuttaa tulosten käsittelyn lisäksi myös simulointeja. Talotekniikkainfon julkaiseman Tiiviiden asuasuinnrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohje paine-erojen hallintaan (2021, 8) ohjeistaa, että asuinhuoneistot tulee huomioida kokonaisuutena paine-eromittauksia suorittaessa. Tämän työn simuloinneissa tarkastellaan huoneistojen ja porraskäytävän välistä paine-eroa ja vuotoilmamääriä sekä huoneiston ulkoseinän yli vallitsevaa paine-eroa. Tästä syystä myös kerrosten pohjat on pelkistetty siten, ettei asuinhuoneiston sisäisiä tilamääriä ole tehty.

4.1.1 Simulointien lähtötiedot

Simuloinneissa ulkovaipan ilmanvuotolukuna q_{50} käytetään arvoa 2. Ilmanvuo-
toa tapahtuu ulkovaipan lisäksi myös oviraoista. Jokaiselle ovityypille on ole-
massa mittaustietoon perustuva ilmanvuotoarvo eli ELA4-arvo (Equivalent Lea-
kage Area), joka kertoo oven vuotoilma-aukon suuruuden ja sitä kautta sen läpi
vuotavan ilman tilavuusvirran 4 Pascalin paine-erolla. Ranta-Aho (2016) käytti
Diplomityössään taulukon 4 mukaisia vuotoilma-aukkojen kokoja eri ovityypeille,
jotka ovat laskettu Ashraen ohjeiden mukaan. Tämän työn simulointimallin ulko-
oviksi on mallinnettu sisääntulokerroksen lisäksi myös parvekeovet. Väliovina on
mallinnettu kaikki porraskäytävään johtavat ovet, pois lukien hissien ovet.

TAULUKKO 4. Vuotoilma-aukkojen koot erityyppisille oville. (Ranta-Aho 2016, 52).

Ulko-ovi	0.009	m ² /ovi
Väliovi	0.0012	m ² /ovi
Hissin ovi	0.0187	m ² /ovi

Tuulen vaikutusta simuloitaessa tuulen suunnalla ja rakennuksen ympäristöllä on
suuri vaikutus tuloksiin luvun 2.3 mukaan. Simuloinneissa käytetään IDA ICE:stä
valmiiksi löytyvää tuuliprofiilia -normaali kaupunkiympäristö. Siinä käytettävä tuu-
len korjauskerroin $a_{IDAICE} = 0.25$. Se vastaa lähestulkoon Ashraen ympäristötun-
nuksen 2 korjauskerrointa. Ashraen määrittämä korjauskerroin vastaavalle ym-
päristötyypille on $a_{Ashrae} = 0.22$ ja se on esitettyinä taulukossa 3. IDA ICE käyttää
korjauskerrointen C_p lähteenä AIVC:n (Air Infiltration and Ventilation Centre) ke-
räämää tutkimustietoa.

Ilmavirtauksia ja paine-eroja tutkittaessa tiloihin määritellyt mitoituslämpötilat vai-
kuttavat tuloksiin. Tilamäärittäessä on käytetty talotekniikkainfon Sisäil-
masto ja ilmanvaihto -oppaan luvun 4 mukaisia suunnittelu-arvoja huonelämpöti-
loille. Oppaassa määritellään asuinhuoneen lämpötilaksi 21 °C ja porrashuoneen
sekä hissikuilun lämpötilaksi 17 °C. (Talotekniikkainfo 2021c, 4).

Tilojen ilmvirrat on määritelty Finvac ry:n (2019) oppaan mukaan, joka käsittelee asuinrakennuksen ilmanvaihdon mitoittamista. Asuinhuoneistojen koneellisen ilmanvaihdon ilmamääräksi on määritelty 0,5 dm³ /s neliometriä kohden. Käytävätilojen vastaavaksi luvuksi on määritetty oppaassa mainittu 0,35 dm³ /s neliometriä kohden.

4.1.2 Simulointimenetelmät

Simulointeja suoritettiin yhdeksän kappaletta ja niistä saatua dataa esitetään kohdissa 4.2 ja 4.3. Luvussa 4.3 suoritettiin sekä kesäajan että talviajan simuloinnit, jotta sääolot muuttuvat mahdollisimman paljon. Koska simuloinneissa on tarkoitus tutkia tuulen vaikutusta rakennukseen, on simuloitavat kuukaudet valittu Ilmatieteenlaitoksen säädatan perusteella.

Hormivaikutusta tutkittaessa suoritettiin seitsemän simulointia. Nämä simuloinnit toteutettiin ilman säädataa vakioulkolämpötiloilla kymmenen asteen välein alkaen -30 °C ja päättyen 30 °C lämpötilaan. Simulointikuukausien valintaperusteena tuulen ja lämpötilaeron yhteisvaikutuksen simuloinneille on käytetty Ilmatieteenlaitoksen tuulitilastoja. Luvussa 4.3 lämpötilaeron ja tuulen aiheuttamaa yhteisvaikutusta tutkittiin simuloimalla yksi kuukausi tammikuun säädatalla. Tutkittaessa yhteisvaikutusta simuloitavan kuukauden valinnassa pyrittiin ottamaan huomioon niin tuuli- kuin lämpötilaolot.

Ilmatieteen tuulitilastojen mukaan vuosien 2006–2022 välillä tammikuussa myrskypäiviä on keskimäärin ollut 4.6 kappaletta, ja se on tilastojen mukaan tuulisin kuukausi joulukuun jälkeen. Myrskypäiviksi lasketaan päivät, jolloin säähavaintopisteellä on mitattu 10 minuutin keskituulen nopeudeksi 21 m/s. (Ilmatieteenlaitos 2022a). Talvitilastojen mukaan tammikuu on keskimääräisesti kylmin kuukausi, joten yhteisvaikutusta simuloitaessa sääolot vaihtelevat mahdollisimman paljon tuulen ja lämpötilojen suhteen. (Ilmatieteenlaitos 2022c).

Simulointimallissa tutkittiin ulkoseinien ja ovien ylitse vaikuttavia paine-eroja. Näitä arvoja ja ohjelmasta saatavia vuotoilmamääriä käytettiin datan visualisointiin ja simulointien analysointiin.

Kuviin 6 ja 7 on merkitty simuloinneissa käytettyjen mittauspisteiden sijainnit. Mittauspisteet (US DP1, US DP2 ja Ovi DP) on esitetty kuvaan punaisilla nuolilla. Simulointien lopputuloksissa porrashuoneen oven ylitse vaikuttavan paine-eron referenssipaineena käytetään mitatun kerroksen käytävää. Ulkoseinän mittauspiste kertoo huoneiston ja ulkoilman välisen paine-eron, jolloin referenssinä käytetään ulkoilman painetta.

4.2 Hormisimuloinnit

Lämpötilaeron vaikutusta tutkittaessa simulointeja suoritettiin seitsemän kappaletta. Näiden simulointien visualisoinnissa päädyttiin käyttämään porrashuoneen ja -käytävän välisen oven mittauspistettä -DP Ovi. Taulukkoon 5 on kerätty saatuja arvoja suoritetuista vakioulkolämpötilasimuloinneista.

TAULUKKO 5. Lämpötilaeron vaikutus paine-eroihin porrashuoneen oven ylitse.

	Lattiakorko (m)				
Ulkolämpötila (°C)	0 m	12 m	24 m	39 m	48 m
-30	-51 Pa	-24 Pa	7 Pa	42 Pa	63 Pa
-20	-38 Pa	-17 Pa	6 Pa	33 Pa	49 Pa
-10	-27 Pa	-12 Pa	5 Pa	25 Pa	36 Pa
0	-16 Pa	-6 Pa	5 Pa	17 Pa	25 Pa
10	-6 Pa	-2 Pa	4 Pa	10 Pa	14 Pa
20	1 Pa	1 Pa	2 Pa	2 Pa	2 Pa
30	2 Pa	2 Pa	1 Pa	0 Pa	0 Pa

Yllä olevasta taulukosta nähdään, kuinka -30 °C simuloinnin alimman kerroksen oven ylitse vaikuttaa yli 50 Pascalin alipaine, jolloin ilma virtaa sisään porrashuoneeseen. Vastaavasti samassa lämpötilassa ylimmän kerroksen porrashuone on yli 60 Pascalia ylipaineinen ja ilma virtaa kohti huoneistoja. Tuloksia tulkittaessa voidaan havaita myös, kuinka paine-erot vähenevät lämpötilaeron pienentyessä. Hissi- ja porraskuilujen lämmityksen asetusarvoksi simulointiohjelmaan on asetettu 17 °C ja muun rakennuksen vastaavaksi arvoksi on määritetty 21 °C. Yllä olevia tuloksia tutkimalla voidaan todeta rakennuksen neutraalitason sijaitsevan lähtökohtaisesti 12–24 metrin välillä.

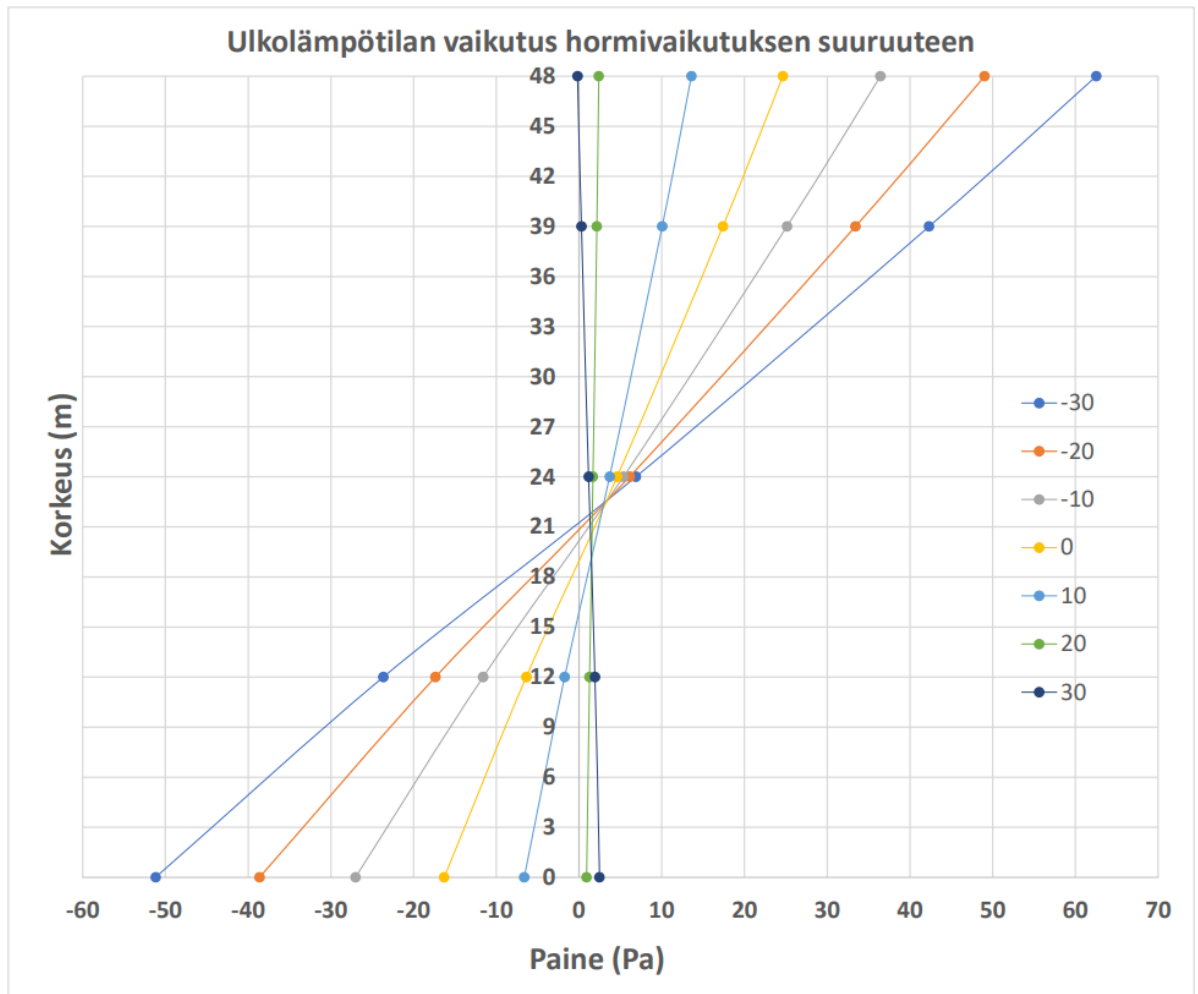
Kesähelteillä ulkolämpötilan ollessa 30 °C hormivaikutuksesta tulee ns. käänteinen, jolloin kuilun yläosasta tulee alipaineinen ja alaosasta vastaavasti ylipaineinen. Tämä johtuu siitä, että simulointia suorittaessa sisälämpötilaksi on asetettu vakiolämpötila, mikä tarkoittaa käytännössä rakennuksen olevan jäähdytetty. Todellisessa, säädätän avulla tehdyssä simuloinnissa jäähdyttämättömän talon sisälämpötila kohoasi paljon tavoitearvoa korkeammaksi, jolloin ilmavirtauksen suunta pysyisi vakiona.

Taulukkoon 6 on laskettu simuloinneista saadut kokonaispaine-erot sisääntulo-kerroksen (0 m) ja ylimmän kerroksen (48 m) välillä. Referenssipisteenä käytetään 0 m korkeutta, jolloin negatiivinen arvo tarkoittaa käänteistä hormivaikutusta.

TAULUKKO 6. Kokonaispaine-ero porrashuoneen alimman ja ylimmän kerroksen välillä.

Ulkolämpötila (°C)	ΔP	
-30	113,7	Pa
-20	87,6	Pa
-10	63,5	Pa
0	41,0	Pa
10	20,2	Pa
20	1,5	Pa
30	-2,3	Pa

Kuvioon 8 on mallinnettu jokaisen seitsemän simuloinnin tulokset. Simuloidut painetasot (Pa) on ilmoitettu suhteessa mittauspisteen korkeuteen metreinä. Simulointien ulkolämpötilojen selitykset on ilmoitettu kuvion oikeassa reunassa. Simulointituloksia tulkittaessa kunkin simuloinnin neutraalitaso voidaan määrittää painekäyrän y-akselin leikkauspisteeseen. Alimmillaan neutraalitaso sijoittuu 15 metriin ulkolämpötilan ollessa 10 °C. Korkeimmillaan neutraalitaso sijaitsee hormivaikutuksen ollessa käänteinen ulkolämpötilan arvolla -30 °C, jolloin se sijaitsee n. 45 metrin korkeudella.



KUVIO 8. Ulkolämpötilan vaikutus hormivaikutuksen suuruuteen.

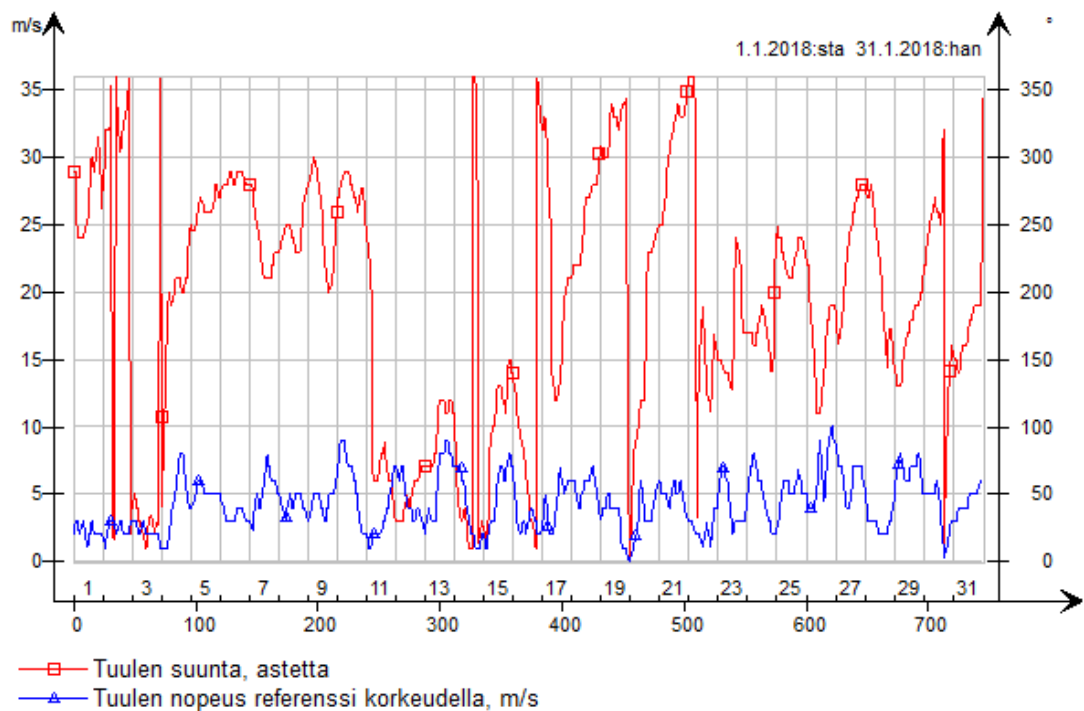
4.3 Yhteisvaikutuksen simulointi

Tuulen vaikutusta rakennuksen painesuhteisiin päädyttiin tutkimaan simuloimalla yhden kuukauden mittainen jakso lämmityskaudella. Tämän simulointijakson aikana rakennuksen sisäistä lämpötilavaihtelua ehtii syntyä, eivätkä tulokset ole vääristyneet vain hetkelliseen ”eritystilanteeseen”. Tässä luvussa suoritettujen simulointien tuloksissa näkyy rakennuksen paine-eroihin vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutus, jolloin myös hormivaikutuksen vaikutus on huomioitu tuloksissa.

Simulointi toteutettiin 1.1.2018-31.1.2018 välisen ajan säädätällä. Yhteisvaikutuksen simulointeja suorittaessa mittauspisteinä käytettiin pisteitä DP US1 ja DP US2.

4.3.1 Paine-erot yhden kerroksen alueella

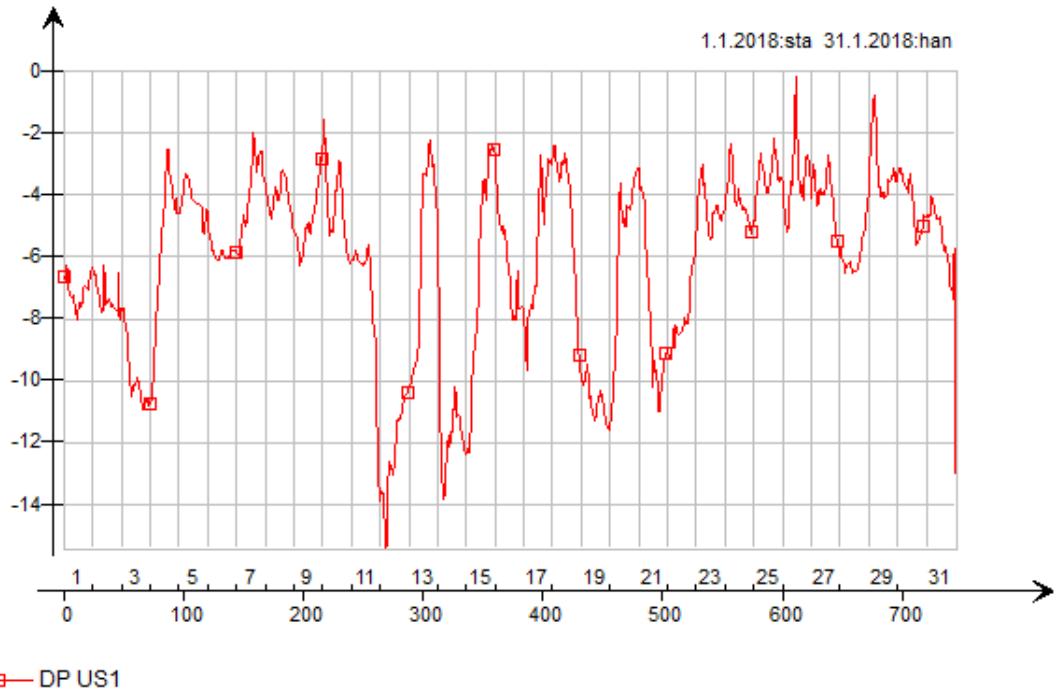
Yhteisvaikutusta tutkivan simuloinnin aikaisen tuulen suunnan ja nopeuden kuvaaja on esitetty kuviossa 9. Tuulen suunta näkyy kuviossa punaisella ja sen arvot on ilmoitettu kuvion oikeassa laidassa. Pohjoisesta puhaltavan tuulen suunta kuvaajassa on 0 astetta. X-akselin arvot ovat mittauspäiviä simuloitijaksolta, joka on 31 päivän mittainen. Simulointimallin pohjapiirustusta kuvasta 7 tarkastellessa voimme todeta, että tuulen suunnan ollessa 0 astetta, mittauspiste DP US1 sijaitsee tuulen puoleisella seinällä.



KUVIO 9. Tuulen suunta ja nopeus tammikuun simuloitijaksolla.

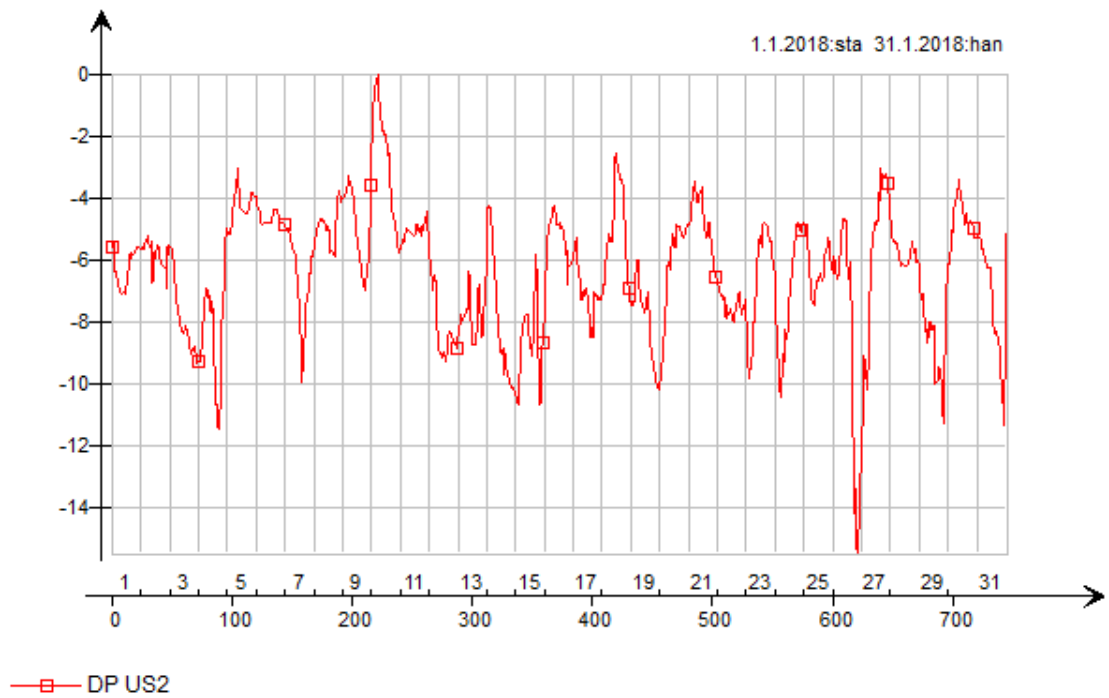
Luvun 2.4.1 esitettyjen korjauskertoimien mukaan seinään tuulen vaikutuksen seinältä mitattuun paineeseen tulisi olla suurimmillaan tuulen osuessa kohtisuoraan mittauspisteen seinää päin. Vastaavasti ulkovaipan suurin alipaine mitataan tuulen osuessa 90 asteen kulmassa samaan mittauspisteeseen. Koska tuloksiin on ilmoitettu sisätilojen vallitsevat paine-erot, on tärkeää muistaa, että tuulen aiheuttama ylipaine rakennuksen seinustalle näkyy tuloksissa negatiivisinä arvoina. Tuulen suuntaa tarkastellessa voidaan siis todeta, että mittauspisteestä

DP US1 saadut arvot tulisi olla pienimillään mittauspäivien 11.–15. välisenä aikana, jolloin tuulen kulma mittauspisteeseen on n. 90 astetta. Kuvion 9 mukaan ajanjakson suurimmat arvot saataisiin tuulen puhaltaessa 180 asteen kulmassa mittauspisteeseen nähden, joka tarkoittaisi karkeasti mittauspäivien 21.–29 välistä aikaa. Tammikuun simulointijakson DP US1 painemittaukset ulkoseinän ylitse on esitetty kuviossa 10 ja painemittaukset DP US2 kuviossa 11.



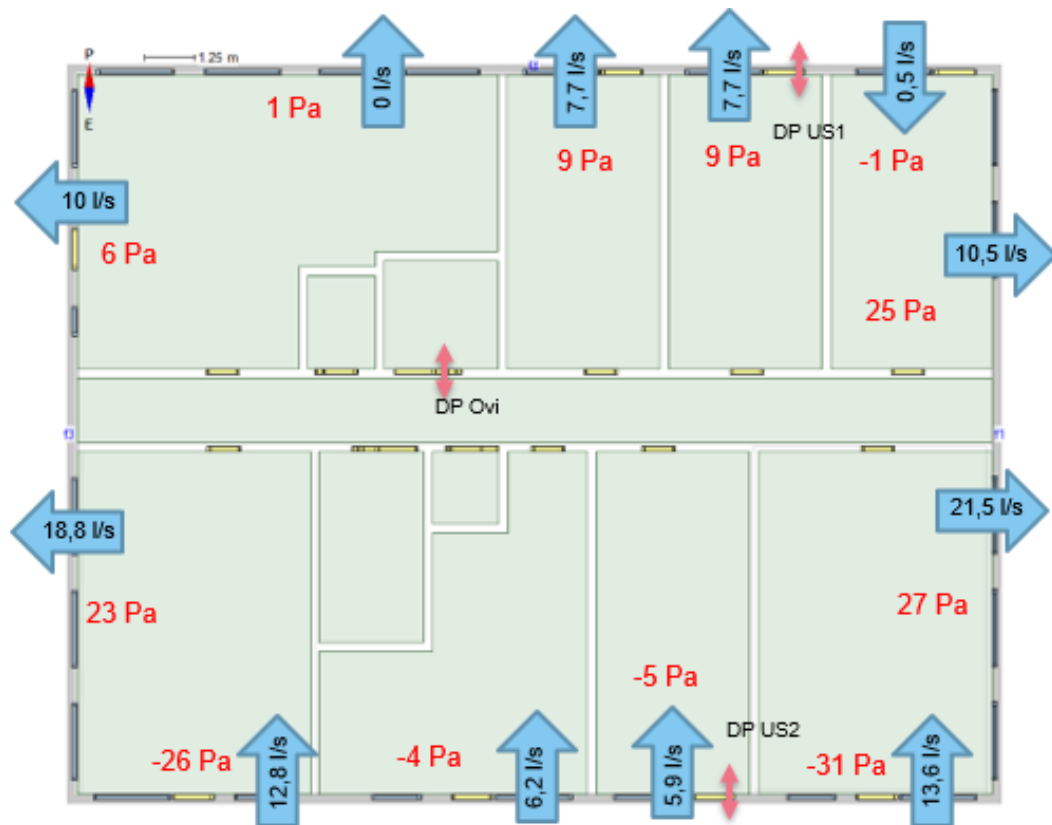
KUVIO 10. Alimman kerroksen DP US1 mittaukset tammikuun simulointijaksolta.

Aikaisemmassa tarkastellussa todettiin, että ulkoseinän mittauspisteen suurin alipaine pitäisi osua päivien 11.–15. väliselle ajalle. Kuvioista 10 nähdään, että mittausjakson pienimmät arvot on saatu tuon ajan sisällä. Vastaavasti tuulen ollessa kohtisuoraa mittauspisteeseen nähden, eli päivinä 21.–29., tulisi mitaustulosten olla suurimmillaan. Yllä olevaa kuviota tulkittaessa voidaan todeta arviointien pitävän paikkaansa, vaikka suurimpien arvojen poikkeama keskiarvosta ei ole yhtä selkeä verrattuna pienimpien mitaustulosten arvoihin.



KUVIO 11. Alimman kerroksen DP US2 mittaukset tammikuun simulointijaksolta.

Koska mittauspisteet sijaitsevat rakennuksen vastakkaisilla seinillä, voimme todeta, että kuvaajien pitäisi olla toisiinsa nähden ”käänteiset”. Tämä tarkoittaa sitä, että kuvion 11 suurimmat arvot pitäisivät sijoittua mittauspäivien 11.–15. väliselle ajalle ja vastaavasti pienimmät arvot päivien 21.–29. välille. Kuvio 11 on tasaisempi verrattuna mittauspisteen DP US1 kuvioon, mutta sitä tarkastellessa minimi- ja maksimiarvot sijoittuvat kyseisille aikaväleille.



KUVA 7. Ylimmän kerroksen (lattiapinta 48 m) hetkellinen paine-erojakauma ja vuotoilmamäärät.

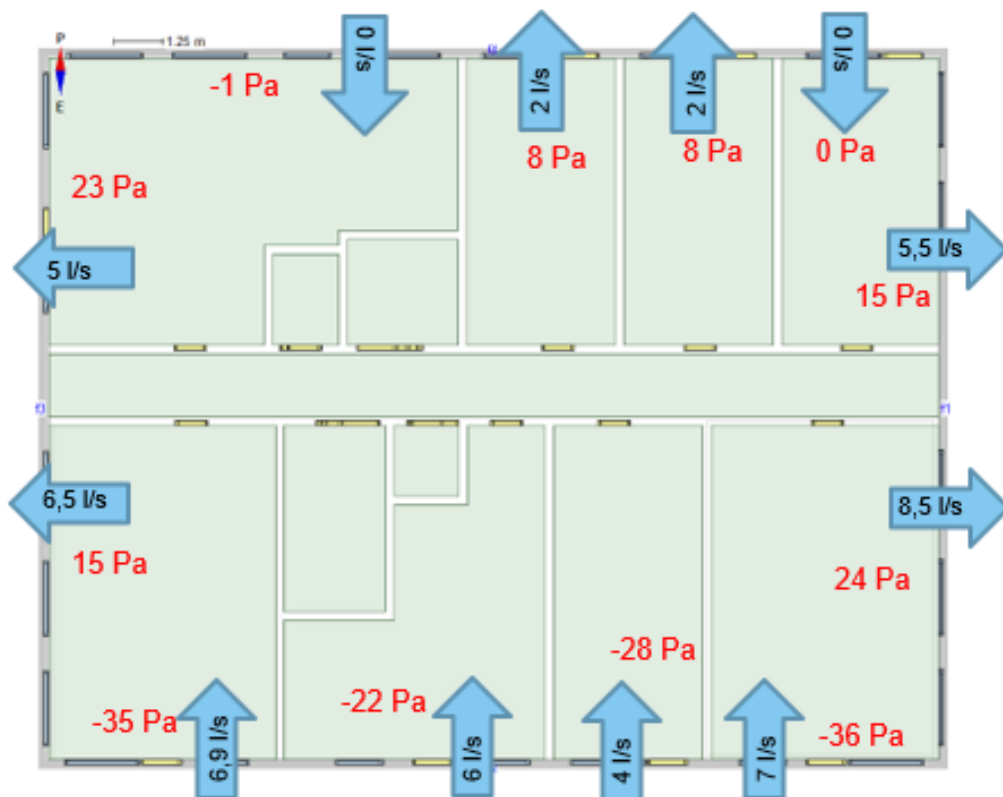
Paine-erojakaumaa yhden kerroksen alueella päädyttiin tutkimaan yhden tunnin ajalta. Kun simuloitava jakso on vain tunnin mittainen, eikä sen aikana ole suurta tuulen suunnan tai nopeuden vaihtelua, voidaan todeta tämän tarkastelun tapahtuvan ns. staattisessa tilassa.

Tuulisuuden perusteella tämän luvun simulointiajankohdaksi valittiin 26.02.2018 klo. 20–21. Kuvassa 7 on ylimmän kerroksen pohjapiirros, johon jokaisen huoneiston ulkoseinän yli mitattu paine-ero kyseisellä hetkellä on merkitty punaisella tekstillä. Simuloinnin hetkellä tuuli puhalsi rakennuksen eteläiselle seinustalle n. 10 m/s nopeudella. Tuulen tulokulma oli simulointiohjelman mukaan n.190 astetta mittauspisteeseen DP US1 nähden. Paine-erojen vaikutuksen havainnollistamiseksi kuviin 7, 8 ja 9 on lisätty nuolet, jotka kertovat ulkovaipan ylitse vuotavan ilman määrän (l/s) sekä sen suunnan. Kaikkien kolmen tutkittavan kerroksen vuotoilmamäärät ovat merkittynä taulukkoon 7.

TAULUKKO 7. Kerroskohtaiset ulkovaipan kokonaisvuotoilmamäärät.

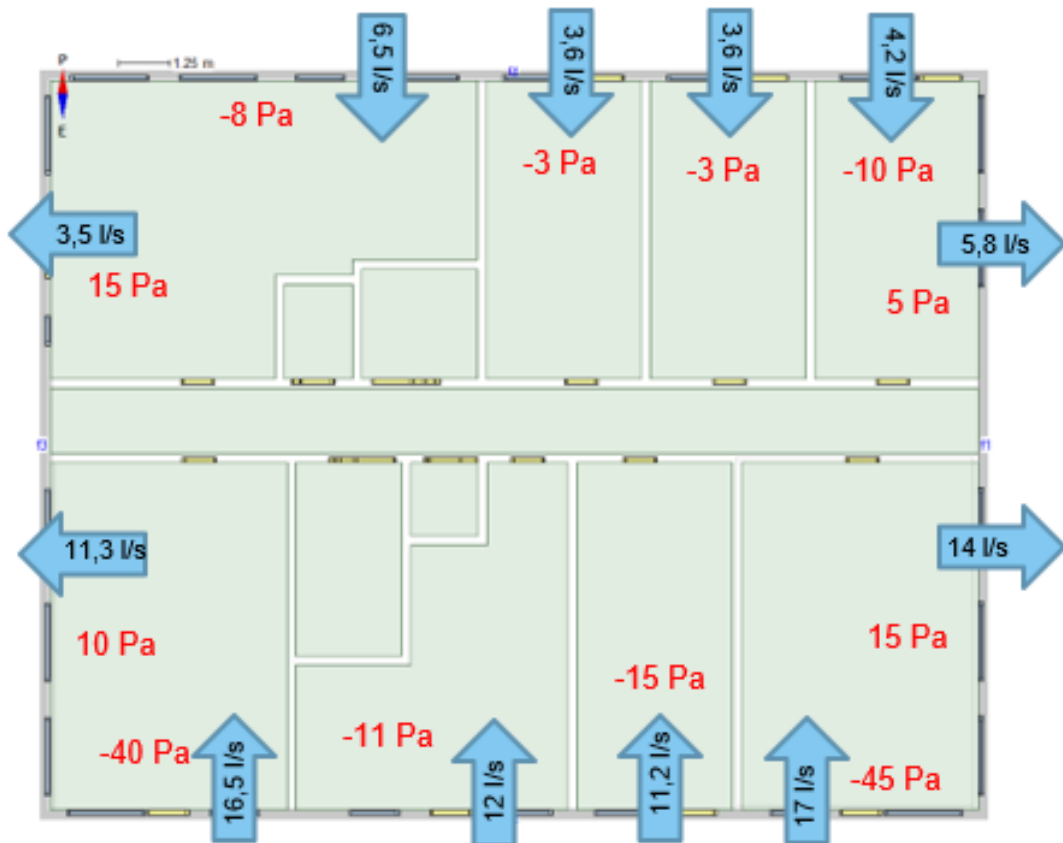
Ulkovaipan vuotoilmamäärät kerroksittain			
Lattia-korko (m)	Sisään yht.	Ulos yht.	Kokonaisvuotoilmamäärä
0	+ 64.6 l/s	- 34.6 l/s	+ 30 l/s
24	+ 23.90 l/s	- 29.50 l/s	- 5.6 l/s
48	+ 39 l/s	- 76.2 l/s	- 37.2 l/s

Kuvaa 7 tarkastellessa sisätilojen alipaineisimmat kohdat sijoittuvat rakennuksen eteläiselle seinustalle, johon tuuli puhaltaa lähes kohtisuoraa. Kuvion 6 korjauskertoimia tarkastellessa huomataan, että ulkovaipan alipaineisimmat kohdat mitataan seinustalta, joka on 90 asteen kulmassa tuulen tulosuuntaan nähden. Tuloksista nähdään, että suurin alipaine vaikuttaa länsi- ja itäseinillä tuulen puhaltaessa etelästä. Tuulen aiheuttama alipaine ulkoseinustalla aiheuttaa ylipaineen rakennuksen sisäosiin, joka voidaan havaita kuvan 7 länsi- ja itäseinustalla.



KUVA 8. Keskimmäisen kerroksen (lattiapinta 24 m) hetkellinen paine-erojakauma ja vuotoilmamäärät.

Kuvista 7, 8 ja 9 voidaan myös todeta, että tuulen puoleisen seinän sisätilat ovat kokonaisuudessaan alipaineessa. Alimman kerroksen painejakauma on esitetty kuvaan 9. Tulosten perusteella suurin alipaine rakennuksen sisällä syntyy tuulen puoleisen seinustan alaosaan. Tämä mahdollisesti selittyy kuvan 1, nuolen 8 aiheuttaman pyörteen ylipaineesta. Kuvion 6 korjauskertoimet tuulen puoleisella seinustalla ovat suurimmillaan rakennuksen keskellä. Kuvasta 8 nähdään, että tuuli vaikuttaa eteläisellä seinustalla eniten keskimmäisiin huoneistoihin, jos vertailukohtana ovat alimman ja ylimmän kerroksen tulokset.

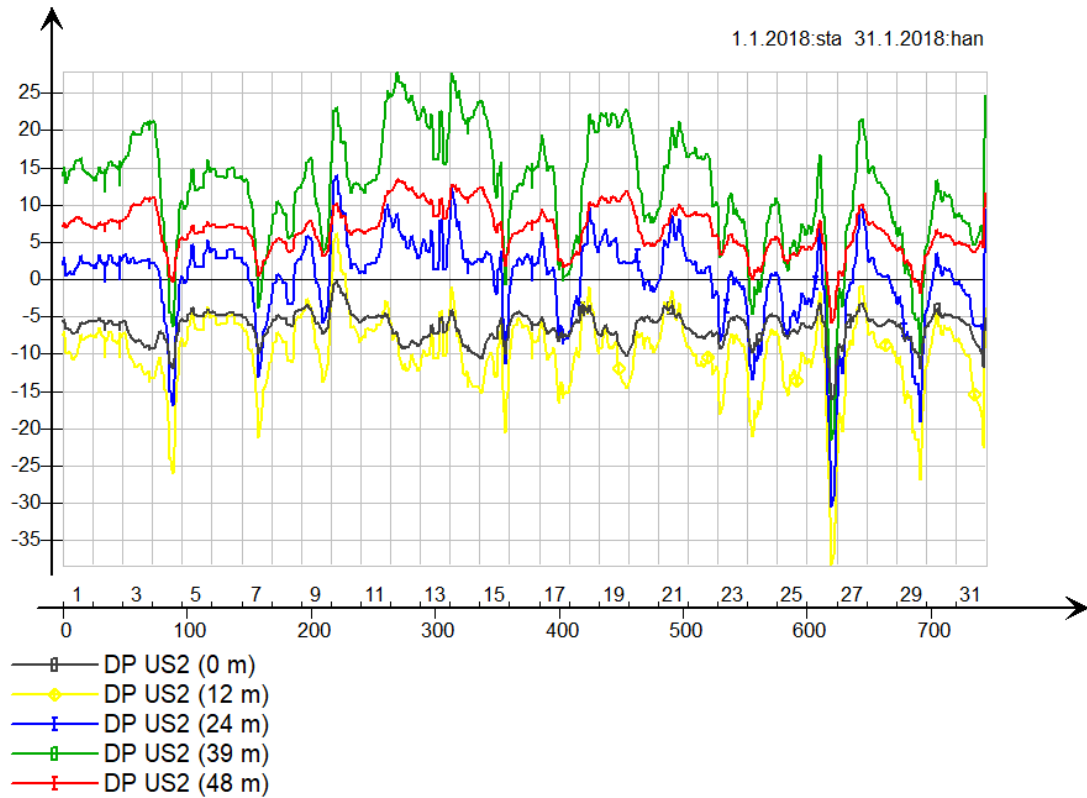


KUVA 9. Alimman kerroksen (lattiapinta 0 m) hetkellinen paine-erojakauma ja vuotoilmamäärät.

4.3.2 Yhden asuntolinjan väliset paine-erot

Luvussa 4.3.1 tutkittiin, miten painesuhteet muuttuvat yhden kerroksen alueella mittauspisteiden sijaitessa vastakkaisilla seinustoilla. Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka korkeus vaikuttaa rakennuksen paine-eroihin huoneiston ulkovaipan

ylitse. Keskitetyssä ilmanvaihtoratkaisussa pystyhormit palvelevat saman asuntolinjan asuntoja monen kerroksen matkalta. On siis tärkeää tutkia, kuinka paljon paine-eroa voi syntyä pelkästään tuulen vaikutuksesta saman runkokanavan takana oleviin asuntoihin.



KUVIO 12. Yhden asuntolinjan DP US2 mittaukset tammikuun simulointijaksolta.

Kuvioon 12 on esitetty mallinnettujen kerrosten painemittaukset pisteestä DP US2. 12 metrin korkeudella oleva mittauspiste on lähes poikkeuksetta alipaineisin. Paine-ero kerrosten välillä on kuitenkin merkittävä. Kuviota tarkastellessa voidaan todeta, että alimpien kerrosten ollessa selvästi alipaineisia, ylimmän kerroksen ulkoseinän ylitse vallitsee paikoitellen jopa 20 Pascalin ylipaine. Yhden asuntolinjan hetkellistä paine-eroa kerrosten välillä tutkittiin tarkemmin myös yhden ns. staattisen tunnin simuloinnilla, jolloin tuulen nopeuden ja suunnan vaihtelut olivat mahdollisimman pieniä. Tässä simuloinnissa käytettiin samaa hetkellistä ajanjaksoa kuin kappaleessa 4.3.1.

Taulukkoon 8 on merkittynä aiemmin valitun tarkempaan tarkasteluun otetun tunnin tilanne yhden asuntolinjan alueella. Taulukon arvot kertovat mittauspisteen DP US2 ylitse vallitsevan paine-eron tuulen puhaltaessa n. 10 m/s noin 190 asteen kulmassa mittauspisteeseen nähden.

TAULUKKO 8. Hetkelliset paine-erot ja ulkovaipan vuotoilmamäärät yhden asuntolinjan alueella.

Mittauspiste	Lattiakorko (m)	Paine-ero (Pa)	Vuotoilmamäärä
DP US2	0	-15	+ 11.2 l/s
DP US2	12	-36	+ 3.2 l/s
DP US2	24	-28	+ 4.2 l/s
DP US2	39	-20	+ 4.6 l/s
DP US2	48	-5	+ 5.9 l/s

Luvussa 2.4.1 esitetyn kuvion 7, 180 asteen korjauskertoimien mukaan suurin alipaine pystysuunnassa rakennuksen seinällä tulisi olla hieman sen keskitason alapuolella. Simuloinnin tuloksia tutkittaessa huomataan, että suurimmat alipaineen arvot on mitattu 12 ja 24 metrin mittauspisteissä. Tämän perusteella voidaan todeta, että väittämä pitää paikkaansa.

5 TUTKIMUSTULOSTEN YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa 4 toteutettujen simulointien tuloksia tarkastelemalla lukijalle pyrittiin havainnollistamaan sääolojen vaikutus huoneistokohtaisesti vallitseviin painesuhteisiin rakennuksen sisätiloissa. Tämän luvun tarkoituksena on pohtia simuloinneista saatujen tulosten vaikutuksia ilmavaihtosuunnitteluun.

Sääolojen aiheuttamien paine-erovaihteluiden teoreettisia vaikutuksia rakennukseen on siis mahdollista tutkia jo suunnitteluvaiheessa monivyoäykesimulointien avulla ennen hankkeen rakennusvaiheeseen siirtymistä. Mutta miten suunnittelija pystyy käyttämään luvun 4 kaltaisten simulointien tuloksia apunaan ilmanvaihtosuunnittelussa?

Kuvien 7–9 tuloksia tarkastellessa voidaan huomata, että jokaisesta simuloidusta kerroksesta löytyy ns. asuntopari. Tuulen puoleisella seinustalla sijaitsevat keskimmäiset asunnot ovat paine-eroltaan ja vuotoilmamääriltään hyvin lähellä toisiinsa. Sama ilmiö näkyy myös jokaisen kerroksen tuulen vastaisella seinustalla. Myös tuulen puoleiset nurkkahuoneistot ovat lähellä toisiaan. Asuntoparien yhteneväiset paine-erot ja vuotoilmamäärät olisi mahdollista ottaa huomioon jo suunniteltaessa keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän runkokanavistoja, jolloin samankaltaisten asuntolinjojen pystyhormit voitaisiin suunnitella saman rungon taakse. Tämä mahdollisesti parantaisi järjestelmän säädettävyyttä.

Ilmanvaihtojärjestelmien toteutustapojen vertailussa luvussa 3 todettiin, että hajautetun ja kerroskohtaisen järjestelmän ulkoilmalaitteet sijoitetaan rakennuksen ulkoseinälle. Hajautetun järjestelmän kohteissa tämä tarkoittaa jokaisen huoneiston seinään asennettavaa ilmanottosäleikköä, jolloin säleikköjen lukumäärä kasvaa suureksi rakennuksen jokaisella seinustalla. Vyöhykekohtaisessa järjestelmässä säleikköjä on vähempi verrattuna hajautettuun toteutukseen, mutta säleiköt sijoitetaan lähtökohtaisesti samalle seinustalle, jolloin jokainen säleikkö on alttiina tuulen vaikutukselle samaan aikaan.

Suurissa kohteissa keskitetty järjestelmä palvelee lähtökohtaisesti kuuden kerroksen alueella. Yhden ilmanvaihtokoneen on tällöin hallittava usean kerroksen

ja huoneiston painesuhteita, joka aiheuttaa hankaluuksia säätöön. Tuulen aiheuttamat paine-erot vaikuttavat rakennuksen ulkovaipalla huoneistojen lisäksi myös järjestelmän ulko- ja jäteilmalaitteisiin. Keskitetyn järjestelmän kohteissa tämä tarkoittaa, että ilmanvaihtokoneen painenvaihtelu vaikuttaa koko rakennuksen ilmanvaihtoon.

Kuvia tarkastelemalla voidaan todeta, että rakennuksen ulkoseinien keskimmäisten asuntojen vuotoilmamäärät eivät ole suuria verrattuna kulmahuoneistojen vastaaviin lukuihin. Tuloksia tarkemmin tutkittaessa huomataan, että pääsääntöisesti jokaisen kulmahuoneiston ulkoseinät ovat keskenään lähes tasapainossa niin paine-eron kuin vuotoilmamäärän suhteen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kulmahuoneistojen ulkoseinien suuret keskinäiset paine-erot tasoittuvat tuulen vaikutuksesta. Kun tarkastellaan koko huoneiston alaa, voidaan siis todeta, että tuulen vaikutukset ovat suurimmillaan rakennuksen keskellä sijaitsevissa huoneistoissa.

Hormivaikutuksen ja tuulen aiheuttamien virtausten takia simulointimallin ylimmästä kerroksesta ulospäin vuotava ilmamäärä on kokonaisuudessaan yli 37 litraa sekunnissa taulukon 7 mukaan. Vaikka rakennuksen ylin kerros on kokonaisuutena tarkasteltaessa ylipaineinen, voidaan kuvasta 7 todeta, että tuulen puoleisen seinustan asunnot ovat alipaineisia ulkoilmaan nähden. Alipaineisuus taasaantuu sisäseinien vuotoilmareittien kautta aiheuttaen ilmavirtauksia huoneistojen ja porraskäytävän välillä.

Talotekniikkainfon julkaisema Tiiviiden asuinrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohe paine-erojen hallintaan käsittelee asuinkerrostalon ilmanvaihtojärjestelmiä. Ilmanvaihtoa toteutettaessa sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero tulisi pyrkiä pitämään 0...-10 Pascalin välillä (Talotekniikkainfo 2021a, 7). Simulointituloksia tarkastellessa voidaan todeta, että tuulen vaikutuksesta rakennuksen keskellä sijaitsevien huoneistojen ulkovaipan ylitse vaikuttava paine-ero voi olla 10 m/s nopeudella puhaltavalla tuulella lähes 30 Pascalia. Tuulen aiheuttamat paine-erot pyritään minimoimaan ilmanvaihtojärjestelmän paineenkorotuksen avulla.

Hormivaikutuksen aiheuttamat paine-erovaihtelut ovat suurimmillaan lämmityskaudella, jolloin porrashuoneiden ylä- ja alaosien paine-erot voivat kohota yli sataan Pascaliin. Ilmanvaihdon säätämisen ajankohtaa tulee miettiä tarkkaan, sillä huonosti säädetty järjestelmä voi aiheuttaa merkittäviä vahinkoja rakennuksen rakenteisiin ja sitä kautta heikentää sisäilman laatua. Kylmällä säällä säädettäessä alimman kerroksen tarvitsema paineenkorotus on merkittävästi suurempi kuin lämpimällä säällä, jolloin hormivaikutuksen aiheuttamat paine-erot tasaantuvat. Toisaalta taas liian lämpimällä säällä suoritettu säätö voi aiheuttaa päinvas-
taisia ongelmia.

Jotta hormivaikutuksen aiheuttamien paine-erojen vaikutus saataisiin minimoitua ilmanvaihtojärjestelmän säätötöiden yhteydessä, olisi ne mielestäni hyvä toteuttaa mahdollisimman neutraaleissa olosuhteissa. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella mahdollisimman neutraali tilanne saavutetaan ulkolämpötilan ollessa n. 10 °C, jolloin hormivaikutusta esiintyy vielä rakennuksessa, mutta sen on vähäistä. Myös erittäin tuulinen keli tekee säätötöistä haastavaa, eikä luotettavia mittaustuloksia ole mahdollista saavuttaa, jos keli on tuulinen. Toisaalta taas aivan tuulettomissa oloissa säädetty järjestelmä ei välttämättä ole ihanteellisin mahdollinen, sillä korkeisiin rakennuksiin kohdistuu lähes poikkeuksetta tuulenpainetta.

6 POHDINTA

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella, miten korkearakentaminen vaikuttaa ilmanvaihtosuunnitteluprosessiin eri järjestelmävaihtoehtoja mietittäessä ja luoda sen avulla pohjaa korkean rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluun. Työn edetessä sääolojen vaikutuksiin rakennuksen painesuhteissa alettiin kiinnittämään erityistä huomiota. Ilmanvaihtojärjestelmien toteutustapojen vertaileminen työssä jäi suppeaksi, eikä työn tavoitteisiin siltä osin päästy.

On kuitenkin tärkeää muistaa, että rakennuksen painesuhteiden hallinta on yksi tärkeimmistä huomioitavista asioista ilmanvaihtojärjestelmää toteutettaessa. Paine-eroihin vaikuttavia asioita käsiteltiin työssä laajasti havainnollistaen koko työn ajan. Kirjallisuusselvityksessä kerätty aineisto tuki simuloinneista saatuja tuloksia, joten simulointiosuus onnistui siltä osin hyvin. Työtä varten luotu simulointimalli toimi oikein ja painesuhteiden tarkastelua eri kohteissa on jatkossa mahdollista toteuttaa työstä saatujen oppien avulla. Työn tuloksia on mahdollista käyttää apuna korkeiden rakennusten ilmanvaihtosuunnitteluohjeistuksen luomisessa painesuhdetarkastelun osalta.

Simulointituloksia ja simulointimallia on mahdollista käyttää lisätutkimuksen pohjana. Lisäperspektiiviä painesuhteiden tarkasteluun on mahdollista saada esimerkiksi rakennuksen simulointimallin sisäisiä vuotoilmalukuja muuttaen. Myös vertailua voisi toteuttaa esimerkiksi vaihtamalla simuloitavan rakennuksen ympäristökertoimia tai muuttamalla rakennuksen korkeutta. Olemassa olevien kohteiden simulointi mahdollistaisi myös tarkistusmittausten suorittamisen ja sitä kautta mittaus- ja simulointitulosten vertailun. Työ avaa ovet myös eri järjestelmätyyppien tarkempaan tutkimiseen ja vertailuun korkeissa rakennuksissa.

Kirjallisuusselvitykseen kerätty tieto antoi paljon uusia näkökulmia tuulen vaikutuksesta rakennuksen teknisiin järjestelmiin. Myös tekninen osaaminen simulointiohjelman käytössä kehittyi työn aikana valtavasti teoreettisen oppimisen rinnalla. Eri järjestelmätyyppien vertailua ja korkearakentamisen vaikutusta niihin

olisi voinut tutkia ja selvittää laajemmin. Kokonaisuudessaan tutkimuksen tekeminen opetti uusia työskentely- ja oppimistapoja sekä antoi ymmärrystä ilmanvaihtosuunnitteluun vaikuttavista asioista.

LÄHTEET

AIVC 2022. Organisaation verkkosivut. Viitattu 25.3.2022.
<https://www.aivc.org/about-us/what-is-aivc>

Ashrae Fundamentals. SI-Versio. Ashrae.

CEF, Type Of Loads Acting On Structures. 2017. Viitattu 16.3.2022.
<https://www.civilengineeringforum.me/type-of-loads-acting-on-structures/>

CTBUH-karttapalvelu. Maailman korkearakentaminen kartalla. Viitattu 26.1.2022. <https://www.ctbuh.org/map>

Finvac Ry 2019. Opas asuinrakennuksen ilmanvaihdon mitoitukseen. Viitattu 23.2.2022. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-asuinrakennusten-ilmanvaihdon-mitoitukseen_2019-C28A5C3D_0A1B_4504_98BB_14D9C1820FE9-144725.pdf/338c293d-f4b5-514b-d6d9-1ddc0dc225f0/Opas-asuinrakennusten-ilmanvaihdon-mitoitukseen_2019-C28A5C3D_0A1B_4504_98BB_14D9C1820FE9-144725.pdf?t=1603260100069

FläktGroup 2021a. Viitattu 17.3.2022. <https://www.flaktgroup.com/fi/ratkaisut/asuntoilmanvaihto/asuntoilmanvaihdon-ratkaisuja/keskitetty-ilmanvaihto/>

FläktGroup 2021b. Viitattu 17.3.2022. <https://www.flaktgroup.com/fi/ratkaisut/asuntoilmanvaihto/asuntoilmanvaihdon-ratkaisuja/asuntokohtainen-ilmanvaihto/>

FläktGroup 2021c. Viitattu 17.3.2022. <https://www.flaktgroup.com/fi/ratkaisut/asuntoilmanvaihto/asuntoilmanvaihdon-ratkaisuja/kerroskohtainen-ilmanvaihto/>

Helsingin kaupunki 2018. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje. Viitattu 26.1.2022.

Ilmatieteenlaitos 2022a. Viitattu 23.3.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot>

Ilmatieteenlaitos 2022b. Viitattu 25.3.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kesatilastot>

Ilmatieteenlaitos 2022c. Viitattu 25.3.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/talvitiilastot>

Laine, Katariina. 2020. Pressure difference in buildings with good airtightness: control measurements after IAQ renovations. Viitattu 28.1.2022. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/32/e3sconf_nsb2020_05001.pdf

Lehtinen, M. Suunnittelupäällikkö. 2022. Asiantuntijahaastattelu 20.3.2022. Tampere. Ei litteroitu.

Sandberg, E 2016a. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Osa 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sandberg, E 2016b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sisäilmayhdistys Ry. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Viitattu 16.3.2022. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekniikka-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>

Talotekniikka RYL 2021. Viitattu 17.3.2022 https://ryl-rakennustieto.fi.libproxy.tuni.fi/ryl/TalotekniikkaRYL/2021_1/

Talotekniikkainfo 2021a. Tiiviiden asuinrakennusten ilmanvaihdon suunniteluohje paine-erojen hallintaan. Viitattu 20.4.2022 https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/tiiviiden_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_suunniteluohje_paine-erojen_hallintaan_19.3.2021.pdf

Talotekniikkainfo 2021b. 6 Sisäilman kosteus. Viitattu 3.2.2022. <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/6-sisailman-kosteus>

Talotekniikkainfo 2021c. 8 Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. Viitattu 17.3.2022. <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/8-ilmanvaihto>

Tampereen kaupunki 2012. Korkean rakentamisen selvitys Tampereen keskusta-alueella. Viitattu 26.1.2022.

Toimivat katot 2019. Viitattu 3.2.2022. https://www.kattoliitto.fi/wp-content/uploads/pdf/Toimivat_katot_2019_netti.pdf.

Vantaan kaupunki 2020. Korkea rakentaminen Vantaalla. Viitattu 26.1.2022.

Vertia Oy, Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 2018. Viitattu 28.1.2022. <https://vertia.fi/wp-content/uploads/2018/06/Ilmatiiveys-ja-vuotokohdat-uusissa-rakennuksissa-2018-1.pdf>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Viitattu 28.1.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Viitattu 21.4.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>