

LASKENNALLINEN
PAINESUHDE
TARKASTELU
KORKEARAKENTAMISESSA JA
DOKUMENTOINTI

Tiivistelmä

Tekijä(t) Vainio, Minja	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 35	Valmistumisaika Kevät 2019
Työn nimi Laskennallinen painesuhdetarkastelu korkearakentamisessa ja dokumentointi		
Tutkinto Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää toimintamalli ja dokumenttipohja painesuhdetarkasteluista korkearakentamisessa siten, että pääkaupunkiseudun rakennusvalvonnan vaatimukset täyttyvät. Työ tehtiin IDA ICE -simulointiohjelmalla, hyödyntäen teorian tietoa ja aiempia tutkimuksia. Työn toimeksiantajana toimi Sweco Talotekniikka Oy, joka on yksi suurimmista Suomessa toimivista LVI-, sähkö- ja rakennusautomaatio-suunnittelun sekä elinkaari palveluiden asiantuntijayrityksistä.</p> <p>Korkean rakentamisen yleistyttyä Suomessa 2000-luvulla on nyt myöhemmin herätty haasteisiin, joita rakennuksen korkeus ja sääolosuhteet tuovat. Toimeenpaneva tekijä työlle oli Helsingin kaupungin tilaama Korkeanrakentamisen rakentamistapaohje, joka on luotu yhdenmukaistamaan korkeanrakentamisen käytäntöjä ja suunnittelua, jotta nämä haasteet huomioitaisiin jatkossa.</p> <p>Työssä keskitytään rakennuksen painesuhteiden aiheuttamiin haasteisiin, joiden merkittävimmät aiheuttajat ovat hormivaikutus, tuuli ja ilmanvaihto. Hormivaikutus muodostuu kylmän ulkoilman ja lämpimän sisäilman termisen paine-eron johdosta, kun korkea rakennus toimii kuin savupiippu. Painesuhteiden muutoksen rakennuksen sisällä aiheuttavat meluhaittoja, ovien käytön vaikeutumista ja rakennuksen yläosien altistumista kosteudelle.</p> <p>Työn tuloksena syntyi optimoitu painesuhteiden mallintamistapa ja dokumenttipohja. Lisäksi työssä käsiteltiin teoriaa liittyen korkean rakentamisen historiaan, yleistymisen syihin, haasteisiin sekä niiden ratkaisuihin. Työ toimii myös teorian lähteenä ja selittää valintoja, joilla toimintamalli on optimoitu. Lisäksi osoitettiin jatkotutkimusten ja kehityksen kohteita, tulevia korkeiden rakennusten painesuhdetarkasteluja ajatellen.</p>		
Asiasanat Korkea rakentaminen, Painesuhteet, Hormivaikutus		

Abstract

Author(s) Vainio, Minja	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2019
	Number of pages 35	
Title of publication Computational pressure ratio review in high-rise building and its documentation		
Name of Degree Bachelor of Energy and environmental technology		
Abstract <p>The purpose of the thesis was to develop an operating model and a documentary base on reviewing pressure ratios in high-rise construction so that the requirements of building supervision in the Helsinki area are met. The work was done with the IDA ICE simulation program, utilizing theoretical knowledge and previous studies. The thesis was commissioned by Sweco Talotekniikka Oy. One of the largest experts in HVAC, electrical and construction automation engineering and life cycle services in Finland.</p> <p>With high-rise construction becoming more common in Finland in the 21st century, it is now acknowledged that it faces challenges caused by the height and climate. An executive factor for the thesis was the High-rise construction guidelines commissioned by the City of Helsinki. Its aim is to unify the practices and design of high-rise construction in order to address these challenges in the future. This thesis focuses on the challenges caused by the building's pressure ratios, which are formed by the stack effect, wind and ventilation. The stack effect is a result of the thermal pressure difference between cold outdoor air and warm indoor air while the tall building works like a chimney. Changes in the pressure ratios inside of a building cause airflow that causes noise nuisance, difficulty in door usage and issues with moisture.</p> <p>As a result of the thesis, an optimized operating model for pressure ratios and a document base were created. In addition, the thesis includes the theory of high-rise construction's history, the causes of its generalization, the challenges and solutions. The purpose of the thesis is to act as a source of theory and to explain the choices that make the operating model optimized. In addition, it is intended to provide further research and development targets in reviewing the pressure ratio in high-rise buildings.</p>		
Keywords High-rise construction, Pressure ratios, Stack effect		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO KORKEARAKENTAMISEN LASKENNALLISESTA PAINESUHDE-TARKASTELUSTA JA DOKUMENTOINNISTA	1
2	YLEISTÄ KORKEARAKENTAMISESTA	2
2.1	Määritelmä ja tavoitteet	2
2.2	Korkearakentaminen Suomessa ja maailmalla	3
3	KORKEARAKENTAMISEN HAASTEET JA RATKAISUT	4
3.1	Haasteet	4
3.1.1	Hormivaikutus, painesuhteet	5
3.1.2	Ilmanvaihto	7
3.1.3	Tuuli	8
3.2	Ratkaisuja hormivaikutuksen vähentämiseen	10
4	LAIT, ASETUKSET JA OHJEET	12
5	TYÖSSÄ KÄYTETYT MENETELMÄT	14
5.1	Ohjelmistot ja esimerkkirakennus	14
5.2	Tutkimusmenetelmät	18
6	TULOKSET JA ANALYSOINTI	21
6.1	Tutkimustulokset	21
6.2	Tulosten esittely	25
6.3	Tulosten analysointi	26
7	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	31
	LIITTEET	33

1 JOHDANTO KORKEARAKENTAMISEN LASKENNALLISESTA PAINESUHDETARKASTELUSTA JA DOKUMENTOINNISTA

Korkearakentaminen on ympäristöään selvästi korkeammalle kohoavan asuin-, toimisto- tai hybridirakennuksen rakentamista. Varsinaista virallista määritelmää ei ole, mutta tässä työssä keskitytään yli 16-kerroksisten rakennusten tarkasteluun. Korkea rakentaminen on yleistynyt Suomessa 2000-luvun alusta lähtien. Sen on ajateltu olevan ratkaisu kaupungistumisen aiheuttamalle tilan puutteelle kasvukeskuksissa ja sen on kaavailtu tarjoavan erilaisia asumismuotoja ihmisille sekä ympäristön kannalta energiatehokkaampaa rakentamista.

Vaikka korkeaan rakentamiseen liittyy paljon huomioitavia asioita, keskitytään tässä työssä rakennuksen laskennalliseen painesuhteiden tarkasteluun. Sen keskeisimpiä vaikuttavia tekijöitä ovat hormivaikutus, tuuli ja ilmanvaihto. Hormivaikutus on kuin savupiippuilmio, joka syntyy, kun kylmän ulkoilman ja lämpimän sisäilman terminen paine-ero voimistaa ilman liikettä. Korkeus voimistaa ilmiötä, jonka seurauksena rakennuksen yläosat ovat alttiita kosteusvaurioille ja alaosissa ovien sekä ikkunoiden käyttö vaikeutuu ja hissi-kuiluissa syntyy herkästi meluhaittoja. Hormivaikutusta voidaan lieventää esimerkiksi kiihdyttämällä, osastoinnilla sekä rakennuksen ulkovaipan tiivistämisellä.

Työn taustalla on Helsingin kaupungin teettämä uusi Korkean rakentamisen rakentamistapaohje (edellinen vuodelta 2012), joka on laadittu yhtenäistämään ja selventämään korkeaa rakentamista (yli 16-kerroksiset rakennukset) sekä sen vaatimuksia Suomessa. Tämän työn tavoitteena on luoda toimintatapa ja dokumenttipohja, joilla hormivaikutuksen voimakkuutta voidaan mallintaa korkeissa rakennuksissa mahdollisimman tehokkaasti ja siten, että pääkaupunkiseudun rakennusvalvonnan vaatimukset täyttyvät. (Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018, 3, 68.) Toimeksiantajana toimii Sweco Talotekniikka Oy, joka on yksi suurimmista Suomessa toimivista LVI-, sähkö- ja rakennusautomaatio-suunnittelun sekä elinkaari palveluiden asiantuntijayrityksistä (Sweco 2019).

Työn aikana tehtävät tarkastelut toteutetaan IDA ICE -simulointiohjelmalla. Työn simuloinneissa ja laskelmissa käytetään esimerkkinä, suunnitteilla olevaa tornitaloa Espoon Keilaniemessä. Se on 34-kerroksinen asuinrakennus Itämeren rannalla. Työn tuloksena olevia valmiita toimintatapaohjeita ja dokumenttimallia käytetään myös Keilaniemen A-tornin rakennuslupaa varten.

2 YLEISTÄ KORKEARAKENTAMISESTA

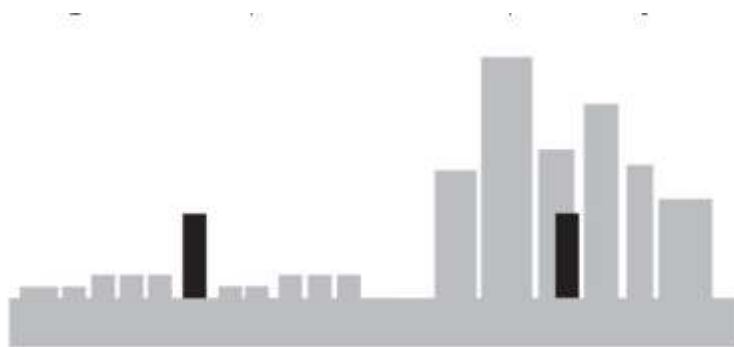
2.1 Määritelmä ja tavoitteet

Korkealle rakentamiselle ei ole olemassa virallista määritelmää ja pelkästään Suomen sisällä määritelmät eroavat kaupungeittain. Esimerkiksi Helsingissä ja Turussa tehdyissä selvityksissä korkearakentaminen on määritelty seuraavasti:

Korkealla rakentamisella tarkoitetaan tässä selvityksessä kaupunkimaisessa alueen siluettiin tai keskeisiin näkyymiin vaikuttavaa, ympäröivän rakennuskannan korkeuksista selkeästi poikkeavaa ja kauas näkyvää rakentamista (Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017, 9).

Espoossa korkearakentaminen määritellään yli 40-metriseksi rakennukseksi ja Oulussa yli 35-metriseksi (Hokkanen 2013; Oulun kaupunki 2014, 3).

Suomessa ollaan vielä kaukana maailman korkeimmista rakennuksista, kun esimerkiksi Aasiassa korkeaksi rakennukseksi määritellään yleensä yli 91 metriä korkea hoikka rakennus. Toisaalta on myös luotu käsitteet superkorkea (300 m) ja megakorkea (600 m). Mutta, kuten Suomessakin, määritelmään vaikuttavat rakennus ja sen suhde muuhun ympäristöön sekä alueen topografia (kuva 1). Rakennuksen pohjapinta-ala on myös vaikuttava tekijä ja jotkin korkeat rakennukset jäävät luokittelun ulkopuolelle liian suuren lattiapinta-alansa vuoksi. (CTBUH 2019.)



KUVA 1. Ympäristön vaikutus korkean rakennuksen määrittämiseen (CTBUH 2019)

Korkea rakentaminen on vastaus kiihtyvään asutuskysyntään kasvualueilla ja ne yhdistetäänkin suuriin, vauraiisiin ja tiheästi asuttuihin kaupunkeihin. Palveluiden ja työpaikkojen keskittyessä suuriin kaupunkeihin liikkuvat myös ihmiset töiden perässä aina vain tiivistyviin kaupunkeihin. Tästä seuraa jatkuva kierre, jossa suuret kaupungit jatkavat

kasvuun. Tilan käytön tehostamiseksi on ryhdytty rakentamaan ylöspäin ja aina vain korkeammat rakennukset ovat yleistyneet.

Korkealla rakentamisella tavoitellaan myös monipuolisempaa asuntotarjontaa, energiatehokkuutta ja korkean rakentamisen ajatellaan edistävän kestäväää kehitystä muun muassa yhteisöllisyyden ja jakamistalouden kannalta (Aatsalo 2018). Lisäksi korkeat rakennukset ovat maamerkkejä, tuovat mainosarvoa ja ovat turistikohteita, kuten esimerkiksi Ruotsin Malmössä sijaitseva Turning torso -asuintorni (Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017,13).

2.2 Korkearakentaminen Suomessa ja maailmalla

Maailmalla suurissa kaupungeissa on jo 1800-luvulta rakennettu pilvenpiirtäjiä. Korkea rakentaminen on lähtöisin Yhdysvalloista (1800-luvun loppu ja erityisesti 1900-luvun alku), jossa sijaitsi 20 vuotta maailman korkein rakennus (442 m Willis Tower, Chicago). Vähitellen korkea rakentaminen yleistyi myös muualla Amerikassa sekä Euroopassa, Venäjällä ja Aasiassa. (Wikipedia 2018.) Nykyisin korkeimmat rakennukset rakennetaan Aasiassa ja esimerkiksi Saudi-Arabian Jeddään on rakenteilla 1000 metrin korkuinen Kindom Tower (Rantapallo 2016). Ratkaisevaa, rakennustavan yleistymiselle on ollut hissitekniikan kehittyminen (Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017,9).

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa korkea rakentaminen on vasta nyt yleistymässä. Esimerkiksi Norjaan on valmistumassa maailma korkein puurakennus (81 m Mjøstårnet, Brumunddal) ja Ruotsin Tukholmaan kaavaillaan Euroopan korkeinta asuinrakennusta (225 m) (Uusi Suomi 2013; Kalrberg 2017). Suomessa 2000-luvulla on ryhdytty rakentamaan yli 20-kerroksisia rakennuksia (Wikipedia 2018). Erityisesti Helsinkiin, mutta myös Tampereelle, Espooseen ja Ouluun. Suomen korkein rakennus on valmistumassa Helsingin Pasilaan (180 m Tornin A). Myös muissa maakunnissa ja kasvukeskuksissa on vireillä yli 10 korkean rakentamisen hanketta. (Aatsalo 2018.)

3 KORKEARAKENTAMISEN HAASTEET JA RATKAISUT

3.1 Haasteet

Jokaisessa rakennusprojektissa on omat haasteensa, jotka aiheutuvat erimerkiksi maantieteellisestä sijainnista ja käytettävistä rakennusmateriaaleista. Kuitenkin korkeaa rakentamista koskevat aivan erilaiset haasteet verrattuna perinteisempiin ja matalampiin rakennuksiin, jotka aiheutuvat juurikin rakennusten korkeudesta. Korkeat rakennukset voivat myös itsessään huonontaa asuinympäristön viihtyisyyttä muun muassa lisäämällä tuulisuutta ja varjostuksia. Lisäksi korkea rakentaminen on kustannuksiltaan kalliimpaa kuin perinteinen, matalampi rakentaminen, eikä se aina takaa tavoiteltua asumisen tiivistymistä ja mukavuutta (alempien kerrosten varjostuminen, näkymät). (Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017, 22.)

Korkeammat rakentamiskustannukset johtuvat muun muassa tiukemmista palo- ja turvallisuusmääräyksistä sekä sähkö- ja LVI-järjestelmien, hissien ja parvekkeiden vaatimista erityisratkaisuksista. Rakennuksen korkeus aiheuttaa jo itsessään haasteita rakennusfysiikalle, kun rakenteilta vaaditaan enemmän lujuutta ja esimerkiksi perinteisen vesiverkoston paine ei riitä nostamaan vettä ylimpiin kerroksiin. Niin Suomessa kuin maailmallakin, tuulikuoritus on yksi merkittävimmistä haasteista suunnittelussa, joka tulee huomioida rakenteiden lujuudessa. (Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017, 15.)

Suomessa ja muissa maissa, joissa on kylmä talvi, ilmenee korkeissa rakennuksissa hormivaikutusta. Sen saa aikaan sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista johtuva paine-ero eli termien paine-ero ja hormivaikutuksen voimakkuus on suoraan verrannollinen rakennuksen korkeuteen sekä lämpötilaeron suuruuteen. Kun korkeaan rakennukseen joudutaan rakentamaan muun muassa hissikuiluja ja porraskäytäviä, muodostavat ne rakennuksen sisälle yhtenäisiä kuiluja eli avoimia pystysuoria tiloja, joissa lämmin ilma pääsee nousemaan. Yhdessä termisen paine-eron ja korkeuden vaikutuksesta kuiluihin muodostuu hormivaikutus, jonka seurauksena rakennuksen sisällä vallitsee suuria paine-eroja, hallitsemattomia ilmavirtoja ja rakennuksen vuotoilma vaipan läpi kasvaa (ks. luku 3.1.2). Hormivaikutuksesta on kerrottu tarkemmin luvussa 3.1.1. (Ranta-aho 2016, 1.)

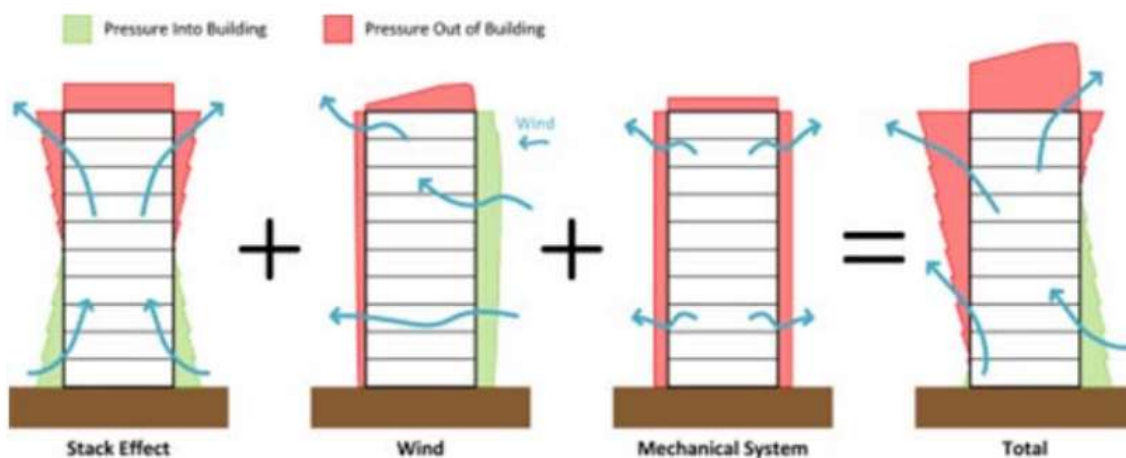
Hormivaikutuksella ja ilmavirtauksilla voi olla monia haitallisia vaikutuksia. Näistä merkittävimpiä Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen (2018, 68) mukaan ovat

- suurempi tilalämmityksen tarve (energian kulutus kasvaa)
- kosteusriskit erityisesti ylärakenteissa

- sisäolosuhteiden heikkeneminen (vedon tunne, meluhaitat, ovien ja ikkunoiden avaus, lämpötilaongelmat)
- ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan häiriintyminen
- epäpuhtauksien siirtyminen sisäilmaan.

Hormivaikutuksen luomat paine-erot vaikeuttavat asuntojen ja porrashuoneiden ovien avaamista, kun oven yli vaikuttaa yli 50 Pa paine-ero. Hissien ovien toimintaa haittaa jo 21 Pa paine-ero. (Nybergh 2014, 21 - 22.)

Hormivaikutuksen (stack effect) lisäksi rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat ilmanvaihto (mechanical system) ja tuuli (wind) (Kuva 2). Hormivaikutuksen luodessa ylipainetta (pun.) rakennuksen yläosiin ja alipainetta (vihr.) alaosiin tuuli muodostaa alipaineen tuulen vastaiselle fasaadille (rakennuksen sivu) ja ylipaineen rakennuksen suojaisalle puolelle. Ilmanvaihto voidaan säätää esimerkiksi painesuhteita tasaavaksi tai kuten kuvassa 2 on mallinnettu ylipaineistetun ilmanvaihdon vaikutusta. Tuulen ja ilmanvaihdon tuomia vaikutteita on avattu laajemmin luvuissa 3.1.3 ja 3.1.4, koska ne ovat oleellisena osana tämän työn tarkasteluissa.

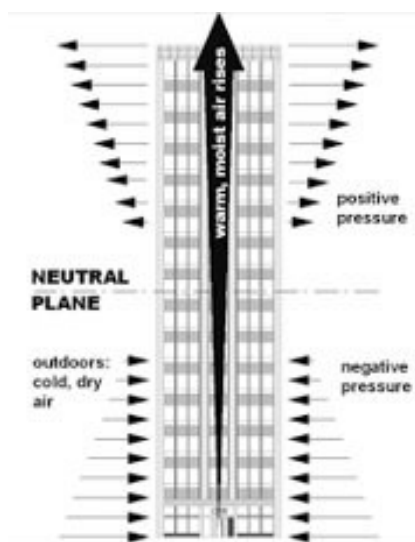


KUVA 2. Korkean rakennuksen paine-eroihin vaikuttavat tekijät (RHD Building Engineering Ltd. 2013, 1)

3.1.1 Hormivaikutus, painesuhteet

Korkearakentamisessa rakennuksen sisällä olevat alhaalta ylös asti avoimet kuilut (hissikuilu, portaitkot) muodostavat savupiippuun verrattavan rakenteen. Sen korvausilma-aukkoina toimivat ulkovaipan ilmapuoto sekä vuotoilma-aukot, kuten ulko-ovet, ikkunat ja ilmanvaihtokanavat. Kuilut ja vuotoilma-aukot mahdollistavat lämpimän ilman nousun ra-

kennuksen sisällä ylös synnyttäen rakennuksen alakerroksiin alipaineen (negative pressure) ja ylimpiin kerroksiin ylipaineen (positive pressure). Alipaineinen tila imee kylmää korvausilmaa vuotoilma-aukkojen kautta. Ilmiö on voimakkaimmillaan talvella, kun lämpötilaero on suurimmillaan. (Ranta-aho 2016, 1-2.) Tämä ilmiö on kuvattu Swegon Academy (2011) tekemässä kuvassa 3.



KUVA 3. Painesuhteiden tarkastelu korkeassa rakennuksessa (Swegon Academy 2011, 53)

Lämpimän, ympäristöään kevyemmän, ilman noustessa ylöspäin rakennuksen sisällä alkaa alipaineinen alaosa vetämään kylmää ulkoilmaa sisään alakerroksien sisääntulo reitien ja vuotokohtien kautta. Rakennuksen yläosissa lämmin ja yleensä enemmän kosteutta sisältävä ilma pyrkii karkaamaan ylipaineisesta tilasta esimerkiksi hissikonehuoneiden kautta. Hormivaikutuksen synnyttämien ali- ja ylipaineiden suuruudet ovat myös verrannollisia rakennuksen korkeuteen. Ilmavirrat sisään ja ulos rakennuksesta ovat aina yhtä suuret. (Ranta-aho 2016, 4, 7.)

Rakennuksen keskivaiheille syntyy kuitenkin selkeä neutraali painetaso (paine ulkovaipan yli 0 Pa). Neutraalin painetason (neutral plane) sijoittumiseen vaikuttaa rakennuksen ylä- ja alaosissa olevien vuotoaukkojen suhde. Niiden ollessa yhtä suuret sijoittuu neutraali painetaso keskelle rakennusta. Jos yläosan vuotoaukot ovat suurempia kuin rakennuksen alaosan, siirtyy neutraali painetaso ylemmäs ja vastaavasti, jos alaosan aukot ovat suuremmat siirtyy neutraali painetaso alemmas. (Ranta-aho 2016, 5.)

Terminen paine-ero voidaan laskea tietylle korkeudelle, jos tunnetaan neutraalin painetason sijainti. Se voidaan selvittää mittauksilla, mutta teoreettisesti voidaan tehdä tarkkojakin laskelmia. Paine-ero vaipan yli voidaan laskea kaavalla 1 vakio lämpötilassa (esim ulkoilma -26°C ja sisälämpötila 21°C), kun tunnetaan neutraali painetaso eli rakennuksen

keskivaiheilla sijaitseva taso, jossa paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli on 0 Pa. (Ranta-aho 2016, 6.)

$$\Delta\rho = (\rho_s - \rho_u)g\Delta h, \text{ jossa} \quad (1)$$

ρ_s sisäilman tiheys, kg/m³

ρ_u ulkoilman tiheys, kg/m³

Δh korkeusero neutraaliin painetasoon verrattuna, m

g gravitaatio kiihtyvyys, 9,81 m/s².

Käytännössä hormivaikutukseen vaikuttavat myös sisärakenteet. Kuilut edesauttavat ilmiötä, kun taas sisärakenteet, kuten välipohjat, ovet ja sisäseinät, pienentävät vaikutusta ja seurauksia. Tämän vuoksi sisärakenteiden tiiveys on otettava tarkemmassa laskennassa huomioon. (Ranta-aho 2016, 7.)

Hormivaikutusta esiintyy aina kun terminen paine-ero kasvaa tarpeeksi suureksi. Myös kesäisin, kun ulkolämpötila on sisälämpötilaa korkeampi. Tällöin hormivaikutuksen suunta kääntyy ja syntyy niin sanottu käänteinen hormivaikutus. Kuitenkaan Suomessa lämpötilaerot eivät muodostu riittävän suuriksi kuin talvella, joten käänteistä hormivaikutusta ei Ranta-ahon (2016) mukaan synny Suomen ilmastossa. (Ranta-aho 2016, 5.)

3.1.2 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon säädöillä voidaan vaikuttaa korkean rakennuksen neutraalin painetason sijoittumiseen. Ilmanvaihdon huomioiminen on tarpeen, sillä perinteisesti Suomessa rakennukset on suunniteltu alipaineisiksi, jotta vältetään kosteuden tiivistymiseltä rakenteisiin (ylipaineisen rakennuksen/tilan ongelma) ja siitä seuraavilta mahdollisilta vakavilta kosteus- ja terveyshaitoilta. (Ranta-aho 2016, 12-13.) FINVAC ry:n tekemän oppaan asuinrakennuksen ilmanvaihdon mitoituksesta (2017, 5) mukaan nykyään ilmanvaihdon suunnittelussa pyritään kuitenkin tasapainoon.

Korkeissa rakennuksissa ilmanvaihto voidaan suunnitella ylipaineisiksi, jolloin alipaineisten tilojen osuus rakennuksen alaosissa vähenee. Tällä ratkaisulla voidaan parantaa korkean rakennuksen energiatehokkuutta, koska ylipaineistamalla joitakin osia rakennuksesta, pienennetään ulkoa virtaavan kylmän vuotoilman määrää ja vähennetään sen aiheuttamaa lisääntynyttä lämmityksen tarvetta. Lisäksi alakerroksien veto- ja melu ongelmat vähentyvät, kun ilmavirta ei ole niin voimakas. (Ranta-aho 2016,12-13.) Vuotoilman lämmitystehon tarve voidaan laskea kaavalla 2.

$$Q = \rho_i c_{pi} q_v (T_s - T_u), \text{ jossa} \quad (2)$$

Q	vuotoilman lämmityksen tehon tarve, W
ρ_i	ilman tiheys, 1,2kg/m ³
c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000Ws/(kgK)
q_v	vuotoilmavirta, m ³ /s
T_s	sisäilman lämpötila, °C
T_u	ulkoilman lämpötila, °C.

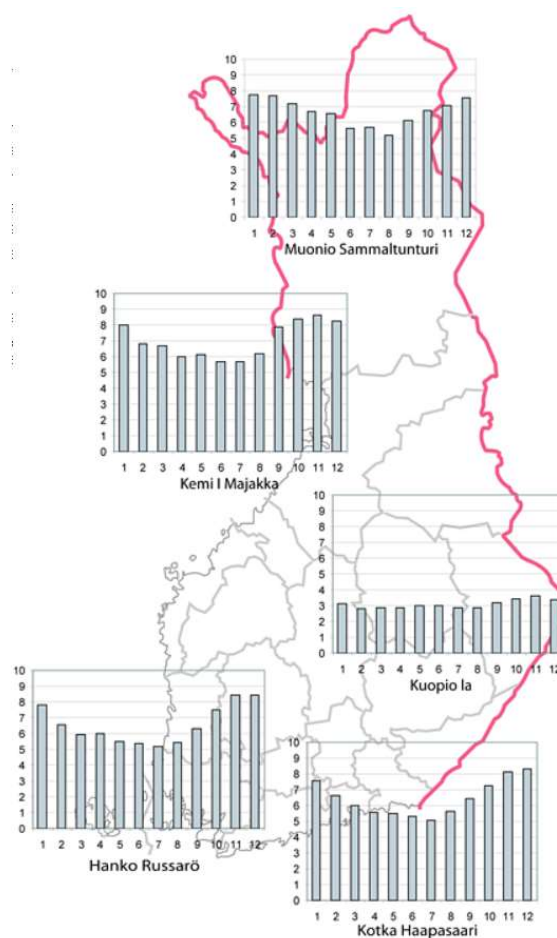
3.1.3 Tuuli

Suomen ilmastovyöhykkeellä tuulisuus on tyypillistä ja vallitseva tuulen suunta on lounas. Se on yksi oleellinen tarkastelun kohde korkearakentamisen painesuhteita ja niiden vaikutuksia laskettaessa. Erityisesti talvikuukaudet (joulu-helmikuu) ovat Suomessa tuulisinta aikaa (Ilmatieteen laitos 2019).

Tuulen vaikutuksia tarkastellessa olisi suositeltavaa käyttää tapauskohtaisia (rakennuksen paikalla) mitattuja arvoja, koska tuulen nopeus vaihtelee riippuen maastosta, muista rakennuksista sekä korkeudesta. Tällaisia, tapauskohtaisia mittauksia, kuten CFD-simulointeja (Computational fluid dynamics), joka on todenmukainen, yhden tai useamman muutujan, tietokonesimulointi tai tuulitunnelikokeista (pienoismallikoe), on kuitenkin harvoin tehty. Usein onkin käytettävä lähimmän sääaseman tarjoamaa tietoa. (Ranta-aho 2016, 15-16.)

Ilmatieteenlaitoksen sääasemilla tuulen nopeus mitataan noin 10 metriä esteiden yläpuolelta avoimessa maastossa (Ilmatieteen laitos 2019). Tämä tieto ei kuitenkaan sovi sinällään painesuhdetarkasteluihin korkearakentamisessa, koska tuulen nopeus kasvaa korkeammalle mentäessä ja korkean rakennuksen ollessa suojaton on tuulen voimakkuudella ja suunnalla merkitystä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2. Ilmatieteen mittaamia tuulen nopeuksia tähän tarpeeseen soveltuvampaa tietoa on saatavissa tuuliatlaksesta, joka on erityisesti tuulivoimaloiden tarpeisiin räätälöity sivusto ja tarjoaa matemaattisella mallilla tuotettuja tuulen nopeuksien todennäköisyysjakaumia (perustuu mittausdataan ja säämalleihin) eri korkeuksille (50-400 m) (Kokkonen & Henttinen 2019; Suomen Tuuliatlas 2019a.).

Tuuliatlaksen tarjoama materiaali on erityisesti korkearakentamisen kannalta oleellista tietoa. Lisäksi tuulen aiheuttamiin seurauksiin vaikuttavat rakennuksen geometria ja sijainti (maantieteellinen, ympäristö). Käytännössä tuulen nopeus on jossakin Tuuliatlaksen ja sääasemilta saatujen arvojen välillä. Kuvassa 4 on esitetty tuulen nopeuden kuukausikeskiarvon vaihtelu muutamilla Ilmatieteen laitoksen sääasemilla. Tuulen keskiarvoinen nopeus on selvästi alhaisempi sisämaassa kuin rannikolla ja puolestaan korkeampi Pohjois-Suomessa kuin etelässä. (Suomen Tuuliatlas 2019b.)



KUVA 4. Tuulen nopeuden kuukausikeskiarvon vaihtelu eräillä Ilmatieteen laitoksen mitauspisteillä. Arvot on esitetty yksikössä m/s. (Suomen Tuuliatlas 2019b.)

Tuuli vaikuttaa rakennuksen painejakaumaan; fasadille, jolle tuuli puhaltaa muodostuu alipaine ja sen vastakkaiselle sivulle ylipaine. Tuulen aiheuttamaa painerasitusta ulkovaipalle voidaan laskea yksinkertaistetusti kaavan 3 avulla. (Ranta-aho 2016, 13-14.)

$$p_w = \frac{1}{2} c \rho v^2 \quad , \text{ jossa} \quad (3)$$

c	rakennuksen geometriasta ja tuulen suunnasta riippuva vakio, painekerroin
p_w	yli- tai alipaine rakennuksen ulkovaipalla, Pa
ρ	ulkoilman tiheys, kg/m ³
v	tuulen keskinopeus, m/s.

3.2 Ratkaisuja hormivaikutuksen vähentämiseen

Korkean rakentamisen haasteisiin on olemassa rakenteellisia sekä taloteknisiä ratkaisuja. Suunnittelu on avainasemassa, kun haasteisiin pyritään vastaamaan. Niin Nyberghin (2014, 92) kuin Ranta-ahonkin (2016, 98) diplomitöissä parhaiksi hormivaikutusta vähentäviksi toimenpiteiksi on esitetty tiivistä ulkovaippaa ja erityisesti hissikuilujen lämpötilan alentamista. Kuitenkaan lämpötilaa ei voida laskea talvella ulkolämpötilaan, joten hormivaikutusta ei pystytä poistamaan kokonaan. Siksi näiden ratkaisujen lisäksi tarvitaan kuitenkin muitakin toimia, jotta korkean rakennuksen jokaisessa kerroksessa olisi mahdollisimman yhtäläiset olosuhteet. Esimerkiksi sisärakenteiden tiivistämistä sekä kuilujen osastointia on lisättävä.

Rakennuksen ulkovaipan ja eri rakenneosien tiiveydellä on suuri merkitys niin rakennuksen energiatehokkuudelle, kosteusvaurioiden ehkäisemiselle, ilmanvaihdon toiminnan parantamiselle kuin hormivaikutuksen estämiselle. Ilmanpitävyyttä eli tiiveyttä kuvataan ilma- vuotoluvulla (q_{50}). Sillä tarkoitetaan ilmavirtaa, joka pääsee rakennuksen vaippa neliönläpi tunnissa ($m^3/h, m^2$), kun ulko- ja sisäpaineen ero on 50 Pa. Mittaus toteutetaan ennen rakennuksen käyttöönottoa ja rakennettavien rakennusten ilmanvuotoluvun tulee olla parempi kuin $4 m^3/h, m^2$ (Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 27§) mutta nykyisin on mahdollista päästä myös alle $1 m^3/h, m^2$. (Uudenmaan lämpökuvaus 2013.)

Rakennuksen suunnittelussa tulisikin huomioida rakennuksen tiiveyttä heikentävät tekijät, kuten sisääntulojärjestelyt (tuulikaapin merkitys vrt. eteinen/sulkutila), parvekkeet, ilmanvaihdon ilmanotot ja ulospuhallukset sekä rakenteelliset heikkoudet esimerkiksi rakennusosien liitoskohdissa. Tiivis rakenne niin sisä- kuin ulkorakenteissa vähentää ilmavirtoja. Lisäksi, etenkin korkeissa rakennuksissa, ulkorakenteiden tiiveys vähentää tuulen vaikutuksia. (Ranta-aho 2016, 33.)

Rakennuksen kuiluista porraskuilut ovat usein hätäpoistumisteitä ja siksi yleensä eteis- tai sulkutilan takana. Tämä parantaa niiden ilmantiiveyttä. Lisäksi tekniikkakuilut ovat paloteknisistä syistä usein ilmatiiviitä ja siksi tarkastelun ulkopuolella. Hormivaikutuksen kannalta usein juurikin hissikuilut muodostuvat suurimmaksi ongelmaksi, koska niiden toiminta saattaa vaatia ilman purkausaukkoja ja niiden ovet eivät ole riittävän tiiviitä. (Ranta-aho 2016, 34.)

Koska pelkällä rakenteiden tiivistämisellä hormivaikutusta ja ilmavirtoja ei voida estää, voidaan kuilujen osastoinnilla vaikuttaa ilmavirtoihin. Kuilujen osastointi perustuu ajatukseen, jossa ilmaa estetään siirtymästä kuiluihin hallitsemattomasti. Käytännössä osastointi yhdessä kerroksessa on sulkutilan tai eteisen rakentamista niin, ettei käynti hisseille tai porraskäytävään onnistu kuin niiden kautta. Osastointi poistaa paine-eron muiden rakenteiden yli lähes kokonaan, kun paine-ero keskittyy osastoiviin rakenteisiin. Rakennuksen käyttöön liittyvät ongelmat, kuten ikkunoiden ja ovien avaus, melu- ja ääniongelmat, vähenyvät. Kuilujen vertikaalinen osastointi perustuu ajatukseen, jossa kuilu ei ole yhtenäinen koko rakennuksen korkeudelta vaan rakennus on ikään kuin jaettu osiin. Tällöin muodostuu useampia neutraaleja painetasoja ja paine-erot pienenevät. (Ranta-aho 2016, 35-38.)

Talotekniset ratkaisut ovat hormivaikutuksen kannalta usein melko rajallisia ja energiatehokkuuden puolesta kannattamattomia. Niiden avulla voidaan kuitenkin teoriassa vaikuttaa hormivaikutukseen korkeissa rakennuksissa ilmanvaihdon (koneellinen tulo- ja poistoilmavaihto) ja lämpötilojen säädöillä. Taloteknisiä ratkaisuja ovat esimerkiksi kerroskohtaiset ilmanvaihtojärjestelmät tai ilmanvaihtokoneiden sijoittaminen palvelualueensa lähelle, painesuhteisen hienosäätö ja kuilujen viilentäminen. Kerroskohtaiset ilmanvaihtokoneet eivät vaadi pitkiä kanavia, jolloin termisen paineen vaikutus ilmanvaihtokanaviin vähenee. Painesuhteiden hienosäädöllä voidaan esimerkiksi ylipaineistaa rakennuksen aula, jolloin vuotoilma ulkoa vähenee. Kuilujen viilentäminen puolestaan vähentää ilman nostovoimaa, jolloin hormivaikutus heikkenee. Kuilujen viilentämiseen voidaan hyödyntää termistä paine-eroa, mutta se vaatii säätöpeltejä sekä lämpötila- ja paineantureita, ettei kuilun lämpötila laske alle kastepisteen. (Ranta-aho 2016, 30, 38-42.)

Muita hormivaikutusta hallitsevia keinoja ovat esimerkiksi automaattiset liukuovet tai pyöröovet rakennuksen aulassa, rakennuksen käytönohjaus ja -rajoitukset (Ranta-aho 2016, 45).

4 LAIT, ASETUKSET JA OHJEET

Rakentamista pientaloista korkeisiin toimisto- ja asuinkerrostaloihin (noin 16-kerroksisiin) ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL 132/1999). Siinä määritellään rakentamiseen liittyvät yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset, lupamenettely sekä viranomaisvalvonta (Ympäristöministeriö 2019).

Tämän lain tavoitteena on järjestää alueiden käyttö ja rakentaminen niin, että siinä luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä edistetään ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurisesti kestävä kehitystä.

Tavoitteena on myös turvata jokaisen osallistumismahdollisuus asioiden valmisteluun, suunnittelun laatu ja vuorovaikutteisuus, asiantuntemuksen monipuolisuus sekä avoin tiedottaminen käsiteltävinä olevissa asioissa. (MRL 1999/132 1§.)

Maankäyttö- ja rakennuslain (1999/132) 117 pykälässä kuvataan olennaiset rakennuksen tekniset vaatimukset. Lain tueksi on säädetty monia asetuksia ja säädöksiä, jotka tarkentavat laissa määritettyjä asioita. Ne on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan ja ympäristöministeriön asetuksiin (Ympäristöministeriö 2019).

Rakennusmääräyskokoelman asetukset Eristyksestä (C) sekä LVI ja energiatehokkuudesta (D) ovat tässä työssä oleellisia. Niissä tarkastellaan erityisesti hormivaikutukseen liittyviä asioita muun muassa ilmanvuotolukua, meluntorjuntaa ja sisäilmaston laatua. (Edilex 2019.) Lait ja asetukset eivät kuitenkaan pysy uusien rakentamismallien mukana ja esimerkiksi korkearakentamisen kohdalla perinteiset määräykset eivät riitä takaamaan riittävää suunnittelua ja sen kautta asumismukavuutta sekä turvallisuutta.

Määräyksien ja lakien riittämättömyydestä johtuen sekä korkearakentamisen yleistyessä nopeasti ovat eri kaupungit, kuten Turku, Helsinki ja Tampere, tehneet selvityksiä korkearakentamisesta. Lisäksi vuonna 2018 Helsingin kaupunki julkaisi uuden Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen. Se koskee yli 16-kerroksisia rakennuksia, ja sen tarkoituksena on selventää korkeassa rakentamisessa vaadittavia lisäselvityksiä. Tässä työssä tarkastellaan erityisesti tuon rakentamistapaohjeen ohjekorttia LVI-4, joka koskee hormivaikutusta ja painesuhdetarkastelua. Maankäyttö- ja rakennuslain (1999/132) pykälässä 117 esitetyt asiat, ovat erityisesti tarkkailussa myös Korkean rakentamisen rakennustapaohjeessa (rakenne-, LVI-, akustiikka- ja paloasiat). (Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018.)

Tämän työn aikana tehdyn dokumenttipohjan tavoitteena oli vastata Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen asettamiin ohjeisiin hormivaikutuksen ja painesuhdetarkastelun osalta. Erityisesti toimintamallin ja dokumenttipohjan tulee noudattaa ohjeita ja prosessista tulee luoda viranomaiskäsitellyn mukainen. Ohjekortissa LVI-04 lueteltuja oleellisia seikkoja, joita dokumenttipohjasta tulee ilmetä ovat

- keskeiset laskentaperiaatteet ja menetelmät
- simulointimalli ja sen toiminta
- käytetyt lähtötiedot (rakenteiden tiiveys)
- tehdyt oletukset (yksinkertaistukset yms.)
- keskeiset tulokset ja johtopäätökset (ilmavirrat, painesuhteet sekä parannusehdotukset) (Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018, 69).

Toinen tarkastelussa huomioitava tekijä on asumisviihtyvyys. Tätä säädellään ympäristöministeriön asetuksessa Uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017). Asumisviihtyvyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa tilakohtaisten lämpötilojen vaihtelut, ääniympäristö, paine-erot sekä ilmanlaatu. Hormivaikutus ja sen aiheuttamat ilmavirrat rakennuksessa voivat heikentää näitä asumisviihtyvyyden parametrejä, jos niihin ei kiinnitetä huomiota. Ympäristöministeriön asetuksessa (1009/2017 4§) on määritelty, että

rakennuksen huonelämpötilan on oltava suunniteltuna käyttöaikana viihtyisä, eivätkä ilman liike, lämpötilasäteily, lämpötilan vaihtelu, lämpötilaerot ja pinta-lämpötilat saa sitä heikentää.

5 TYÖSSÄ KÄYTETYT MENETELMÄT

5.1 Ohjelmistot ja esimerkkirakennus

Sopivan toimintamallin eli sen, kuinka korkeiden rakennusten painesuhteita tutkitaan, ja dokumenttipohjan työstö aloitettiin maaliskuussa 2019 luomalla esimerkkirakennuksesta geometrinen malli MagiCAD Room -ohjelmalla. Sen avulla voidaan rakennuksesta luoda 3D-malli, joka voidaan IFC-muodossa (Industry Foundation Classes) siirtää simulointiohjelmiin. MagiCAD on AutoCAD -ohjelman yksi lisäosa. (MagiCAD 2019.) Varsinainen painesuhdetarkastelu tehtiin IDA ICE (Indoor Climate and Energy) -simulointiohjelmalla, jolla voidaan mallintaa tarkasti suunniteltu rakennus todellisilla ilmanvaihtomäärillä, energiankulutuksella, rakenteilla ja sääolosuhteilla. Se on dynaaminen monivyöhykemallinnukseen räätälöity simulointiohjelmito. Ohjelman mallit pohjautuvat tutkimustietoon, ja siihen on integroitu kohdemaata koskevia säätietoja ja rakennusstandardeja. (EQUA 2018.)

Tutkimuksessa esimerkkirakennuksena käytetään Espoon Keilaniemen suunnitteilla olevaa asuinkerrostaloa. Se on yksi neljästä kartiomallisesta pilvenpiirtäjästä, joista korkeimmassa on 40 kerrosta. Simuloinneissa käytettävässä kerrostalossa on 34-kerrosta ja sen rakentamisen on määrä alkaa vuoden 2019 aikana (kuva 5). (Siironen 2018.)



KUVA 5. Havainnekuva Keilaniemen asuinkerrostalosta (Sarc Architects 2019)

Painesuhdetarkastelun kannalta oleellisia lähtötietoja ovat rakennuksen tavoiteltu ilmanvuotoluku, ovien ilmanvuotoarvot (ELA_4), tilojen ilmamäärät ja lämpötilat sekä tuuliprofiiliin ja painekertoimien valinta. Simuloinneissa käytetyt tilojen ilmamäärät ja lämpötilat on esitetty taulukossa 1. Rakennuksessa on kerroskohtaiset ilmanvaihtokoneet eli ilmanvaihtokuiluja ei ole ja ne ovat päällä koko ajan. Tuloilman lämpötila on 19°C , mutta laskelmissa

on huomioitava ilman 1 asteen lämpeneminen ilmastointikanavassa. Hissikuiluissa ei ole lämmitystä eikä jäähdytystä.

TAULUKKO 1. Simuloinneissa käytetyt tilojen ilmamäärät ja lämpötilat

	Tulo	Poisto	Yksikkö	Lämpötila (°C)
1H+KT+VIHERH	23	-23	l/s	21
2H+KT+VIHERH	23	-23	l/s	21
3H+KT+VIHERH	33	-33	l/s	21
3H+KT+2xVIHERH	38	-38	l/s	21
Käytävä ja Aula	1	-1	l/m ²	21
Ravintola	4	-4	l/m ²	18
Liiketilat	2	-2	l/m ²	18
Muut (mm. PRH, Huoltotilat, Varastot, Pesula)	0.5	-0.5	l/m ²	17/22

Taulukossa 2 on esitetty simuloinneissa käytetty rakennuksen ulkovaipan ilmanvuotoluku (q_{50}) ja vuotoaukoille ilmanvuotoarvot eli ELA_4 -arvot (equivalent leakage area). Koska saatavilla ei ollut suunniteltuja ilmanvuotoarvoja, käytettiin simuloinneissa Ranta-ahon (2016, 52) ja Nyberghin (2014, 51) diplomitoissa käytettyjä ilmanvuotoarvoja. Nämä arvot ovat peräisin ASHRAE (1993) tietokannasta, joka ei työtä tehdessä ollut käytettävissä. ELA_4 -arvo kuvaa rakenteen teoreettisen ilmanvuotoaukon kokoa, joka vastaisi koko rakennuksen ilmanvuotolukua, jos molemmat altistettaisiin 4 Pa termiselle paine-erolle (RED 2019). Ilmanvuotoaukot ovat tärkeä mallintaa tarkasti, koska niiden koolla ja sijoittumisen suhteella on suora vaikutus neutraalin painetason sijoittumiseen rakennuksessa. Ilmanvuotoaukkojen osalta päädyttiin jatkossa pyytämään arvot suunnittelijalta, mutta niiden puuttuessa käytetään tässä työssä käytettyjä ohjearvoja.

TAULUKKO 2. Simuloinneissa käytetty rakennuksen ilmanvuotoluku sekä ovien ilmavuotoarvot (ASHRAE 1993, Nyberghin 2014, 51 ja Ranta-ahon 2016, 52 mukaan)

Ulkovaippa (q_{50})	0.5	m ³ /(h.m ²)
Hissin ovi	0.0187	m ² /ovi
Ulko-ovi	0.009	m ² /ovi
Aulan pyöröovi	0.0015	m ² /ovi
Väliovi	0.0012	m ² /ovi

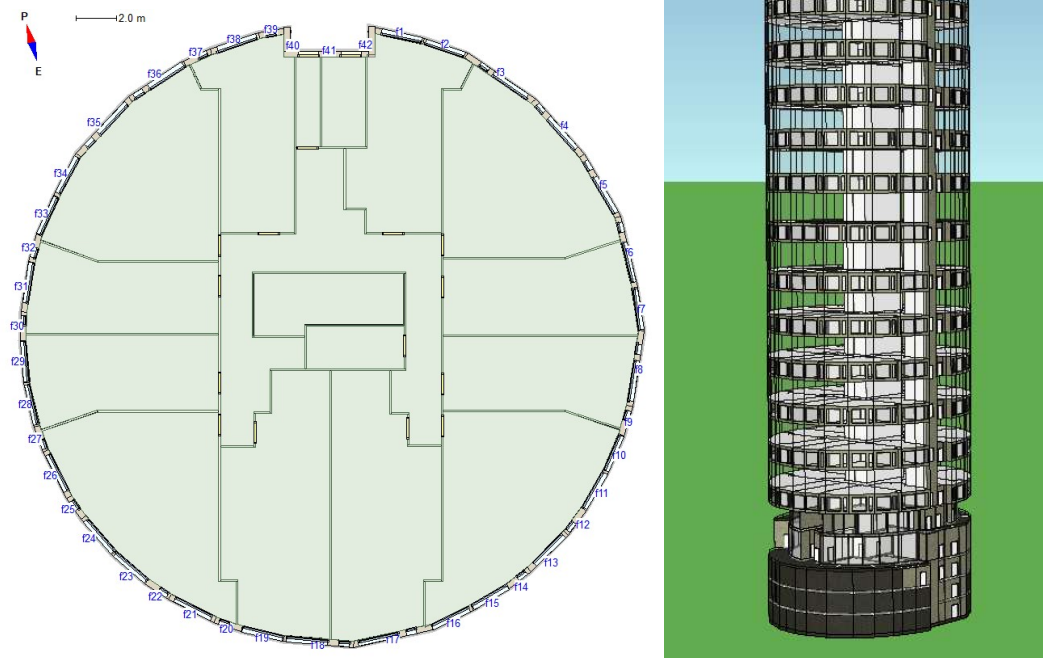
Simulointien kannalta on myös oleellista tietää, millaisella alueella rakennus sijaitsee (topografia ja muut rakennukset) ja rakennuksen suuntaus. Nämä asiat vaikuttavat valittavaan tuuliprofiiliin. IDA ICE -ohjelmassa on valmiiksi integroitua profiileja (esim. Maa-

seutu, Taajama, Ydinkeskusta), jotka kuvaavat erilaisia maasto- ja kaupunkityyppejä. Lisäksi ohjelmaan on integroitu eri maille ja kaupungeille laskettuja pitkän ajan säätiedostoja, joita se käyttää laskelmissa. Tässä työssä referenssitiedostona käytetään Helsinki-Vantaa 2012 – tiedostoa, joka on vuosien 1980-2009 keskiarvoinen sää 12 kuukauden aikana.

Tarkimmat tuulen aiheuttamat painekertoimet saadaan kohdekohtaisista CFD-simuloinneista tai tuulitunnelikokeista. Painekertoimet ovat jokaiselle rakennuksen fasadille laskettavia vakioita, joiden suuruudet riippuvat rakennuksen geometriasta ja tuulen suunnasta. Esimerkkirakennukselle on tehty kyseiset simuloinnit. Niiden tulosten tuominen simulointiohjelmaan osoittautui kuitenkin vaivanloiseksi muunmuassa rakennuksen muodon takia, joten simuloinneissa päädyttiin käyttämään IDA ICE- ohjelman laskemia painekertoimia. Lisäksi vain harvoille rakennuksille on tehty vastaavanlaisia simulointeja.

Kohderakennus sijaitsee täyttömaalla meren rannalla ja alueelle on jo aikaisemmin rakennettu tornitaloja. Simuloinneissa käytetään tuuliprofiilina simulointiohjelman Meri-profiilia, koska on oletettua, että se vastaa tuulen todellista mallia parhaiten. Tuulen suunnaksi valittiin lounas, koska se on Suomelle ja erityisesti rannikkoalueille vallitseva tuulenpuhallussuunta.

Painesuhdetarkastelussa oleellisia geometrian mallinnukseen liittyviä asioita ovat erityisesti kuilujen ja osastovien rakenteiden mallinnus. Merkitsevät kuilut, kuten hissikuilut ja porraskäytävät, on mallinnettava yhtenäisenä tilana (ks. kuva 6) ja porraskäytävien ynnä muiden uloskäyntien osastointi on mallinnettava todenmukaisesti. Palomieshissi, hätäpoistumistiet ja erilaiset talotekniikkakuilut on palomääräysten takia rakennettava erittäin tiiviiksi, jolloin ne eivät painesuhdetarkastelun kannalta ole oleellisia. Toisaalta rajoitteita luo IDA ICE -ohjelman kapasiteetti. Sillä voidaan sujuvasti mallintaa noin 250-300 tilaa, joten jokaista tornitalon tilaa ei voida mallintaa.



KUVA 6. Vasemmalla perusasunikerroksen pohjapiirustus, jossa on yksiöitä, kaksioita ja kolmioita sekä oikealla periaate, jolla rakennus on mallinnettu IDA ICE -ohjelmassa.

Kuvassa 6 on esitetty perusasunikerroksen pohjapiirustus sekä suuntaus. Asunikerroksia on rakennuksessa kaikkiaan 29 kappaletta. Ne eivät todellisuudessa ole keskenään identtisiä. Ajan säästämiseksi ja lähtötietojen puutteen vuoksi 12 asunon peruserrosta on käytetty kaikkien asunikerrosten mallintamiseen. Simuloinneissa on mallinnettu vain joka toinen asunikerros ja niiden tiedot on kloonattu, jolloin simulointiohjelma laskee tulokset kuin kaikki kerrokset olisi mallinnettu. Lisäksi on mallinnettu jokseenkin yksinkertaista viisi alinta kerrosta, joissa sijaitsee esimerkiksi varastotiloja, aula ja liiketiloja, jotka eivät ole keskenään samanlaisia.

Simulointien kannalta tarpeetonta tietoa ovat tilakuormat ja rakenteiden U- ja g-arvot (ikkunat), sekä kylmäsilat. Laskelmissa voidaan käyttää Suomen Rakennusmääräyskokoelmassa (C3 Rakennuksen lämmöneristys) luvussa 3 linjattuja maksimiarvoja.

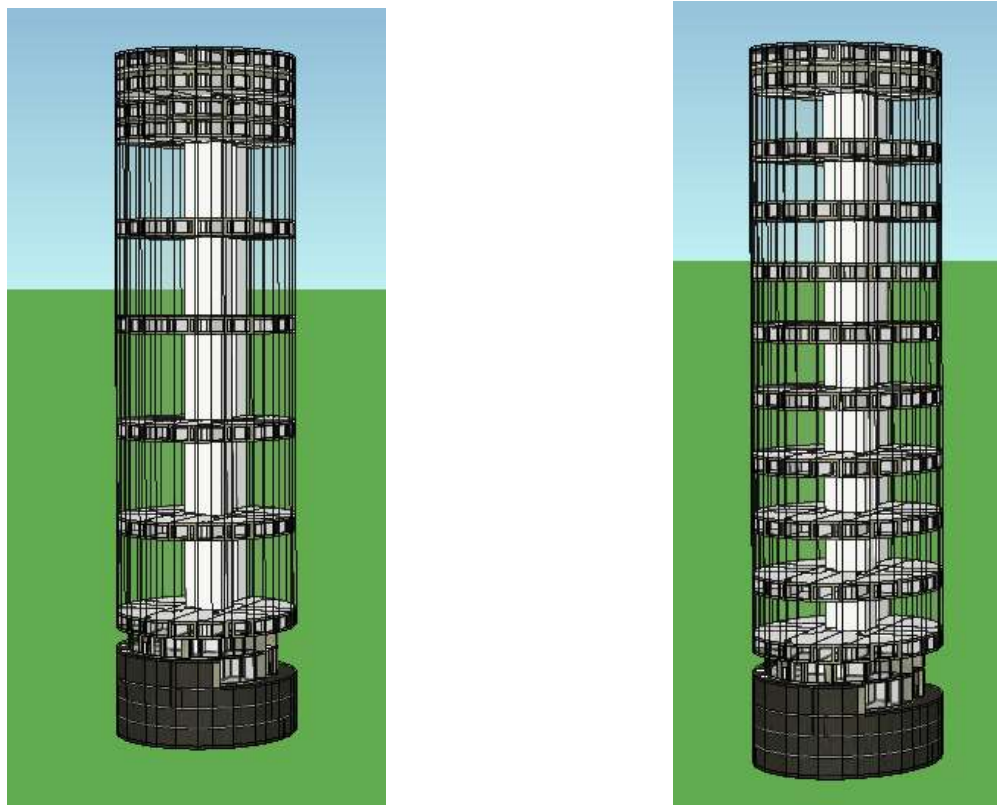
5.2 Tutkimusmenetelmät

Varsinainen tutkimustyö keskittyi toimivan ja mahdollisimman tarkan toimintamallin (simulointimallin toiminta) löytämiseen. Tutkimus kohdistui erilaisten muuttujien, kuten sääprofiilien (ulkolämpötila, tuuli), ilmanvaihtojärjestelmän sekä geometrisen mallin yksinkertaistamisen vaikutuksien vertailuun tulosten tarkkuuden suhteen. Kaikki erilaiset simulointivariaatiot on esitetty taulukossa 3. Erilaisten simulointivariaatioiden avulla pyrittiin mallia optimoimaan ja todentamaan sen toimivuus. Tutkimus aloitettiin Perustapauksen (0) simuloinnilla ja tulosten keräystävän määrittämisellä (Excel-työkalu). Tämän jälkeen eri variaatioiden tuloksia voitiin verrata perustilanteeseen.

TAULUKKO 3. Tutkimuksen aikana tehdyt simulointivariaatiot. Kaikissa tapauksissa on käytetty taulukoissa 1 ja 2 esitettyjä lähtötietoja ja simulointimallia. Tapauksissa 1-4 vain kuvauksessa mainittuja asioita on simulointimallissa muutettu verrattuna perustapaukseen.

	Nimi	Kuvaus	Syy
0	Perustapaus	Ks. kpl 5.1 Ovet ja ikkunat kiinni, ulkolämpötila -26°C, tuulenopeus 10m/s 225°(lounaasta)	Perussimulointimallin luonti ja sen toimivuuden tarkistus
1	Tilojen kloonaus	Vähemmän mallinnettuja tiloja; joka 3. asuinkerros ja joka 5. asuinkerros	Kloonauksen ja tulosten interpoloinnin vaikutukset tuloksiin ja mahdollinen simuloinnin nopeuttaminen
2	Tuuli	Tuulen nopeuden muuttaminen 2m/s, 20m/s	Tuulen nopeuden vaikutuksen tutkiminen paine-eroihin ja kerroskohtaiseen painetaseeseen
3	Ulkolämpötila	Ulkolämpötila -5°C	Ulkolämpötilan vaikutus ilmavirtojen voimakkuuteen
4	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto pois päältä	Pelkästä termisestä paine-erosta ja tuulesta johtuvan hormivaikutuksen selvittäminen

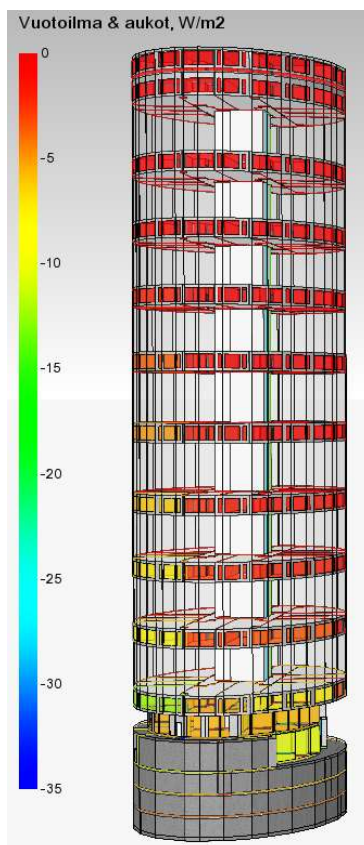
Erilaisten variaatioiden (1-4) simuloinnit ja vertailut aloitettiin ulkolämpötilan muuttamisesta, koska haluttiin varmistua mallin toimivuudesta. Tämän jälkeen tutkittiin pelkästä termisestä paine-erosta ja tuulesta johtuvan hormivaikutuksen aiheuttamien ilmavirtojen suuruutta. Tilojen kloonausta tutkittiin, jotta saataisiin tietää, kuinka yksinkertaistetuksi simulointimalli voidaan jättää ilman, että tuloksien tarkkuus kärsii liikaa. Kuvassa 6 on havainnollistettu tutkitut vaihtoehdot.



KUVA 7. Kloonauksessa tutkitut vaihtoehdot. Vasemmalla joka 5. asuinkerros on kloonnattu ja oikealla joka 3.

Simulointien edetessä ja niiden tuloksia vertailtaessa todettiin, että kerroskohtaisten ilmavirtojen suuruudet olivat helposti saatavilla simulointituloksista. Niiden pääteltiin kuvastavan kerroksen paine-eroja, sillä mitä suurempi paine-ero, sitä enemmän ja voimakkaampia ilmavirrat ovat. Kuitenkaan, koska teoriassa ei otettu kantaa ilmavirtojen ja paine-erojen todelliseen verrannollisuuteen, päädyttiin tutkimaan myös paine-erojen mahdollista mallintamista tuloksissa.

Tuulen nopeuksien vaikutuksia koko rakennuksen painesuhteisiin tutkittiin kahdella eri nopeudella (2 m/s ja 20 m/s) perustapauksen (10 m/s) lisäksi (kuva 8). Vuotoilmamäärissä havaittiin suuriakin eroja mutta kaikkien käytettyjen tuulen nopeuksien todettiin olevan liian epätodennäköisiä, jotta ne olisivat merkittäviä. Päädyttiin etsimään erilaisista lähteistä Suomen alueelle tyypillistä talviajan vallitsevaa tuulennopeutta. Tuulen vaikutusta (suunta, voimakkuus) kerroksen painetaseeseen päätettiin myös tutkia 4. kerroksessa (17,5 m) kahdessa eri tuulen nopeudessa (2 m/s ja 10 m/s).



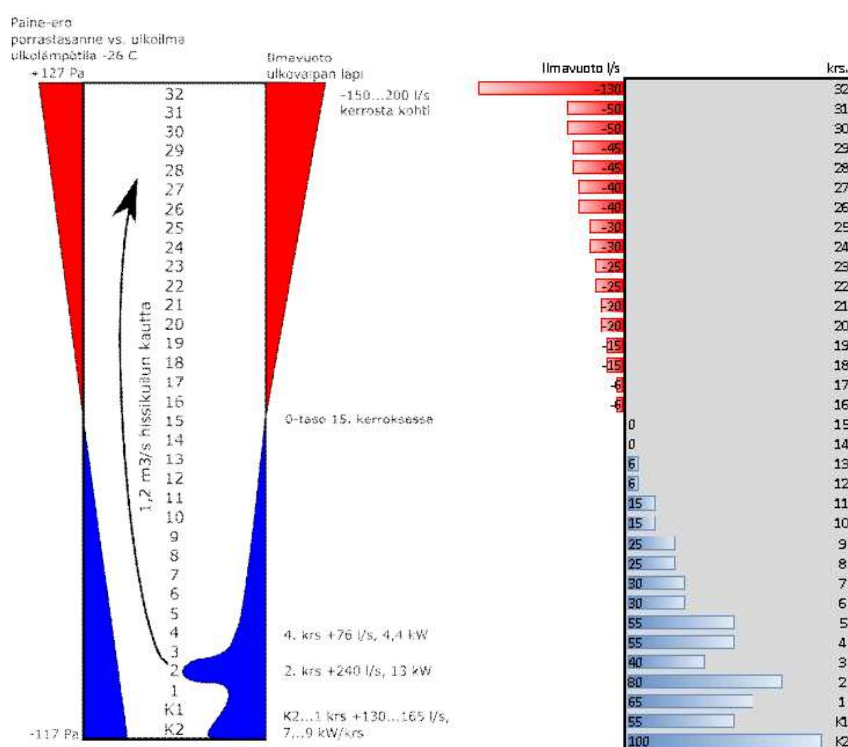
KUVA 8. Havainnekuva simulointiohjelmasta saatavasta kuvasta, jossa näkyy tuulen vaikutus.

Varsinaisen dokumenttipohjan teossa hyödynnettiin vanhoja samankaltaisia yrityksen pohjia ja aikaisempien painesuhdetarkastelujen mallintamistapoja (kuva 9). Lisäksi hyödynnettiin kollegoiden mielipiteitä, jotta dokumenttien tarkkuus ja sisältö saatiin määritellyä. Excel-työkalu toteutettiin yhteistyössä vanhemman kollegan kanssa.

6 TULOKSET JA ANALYSOINTI

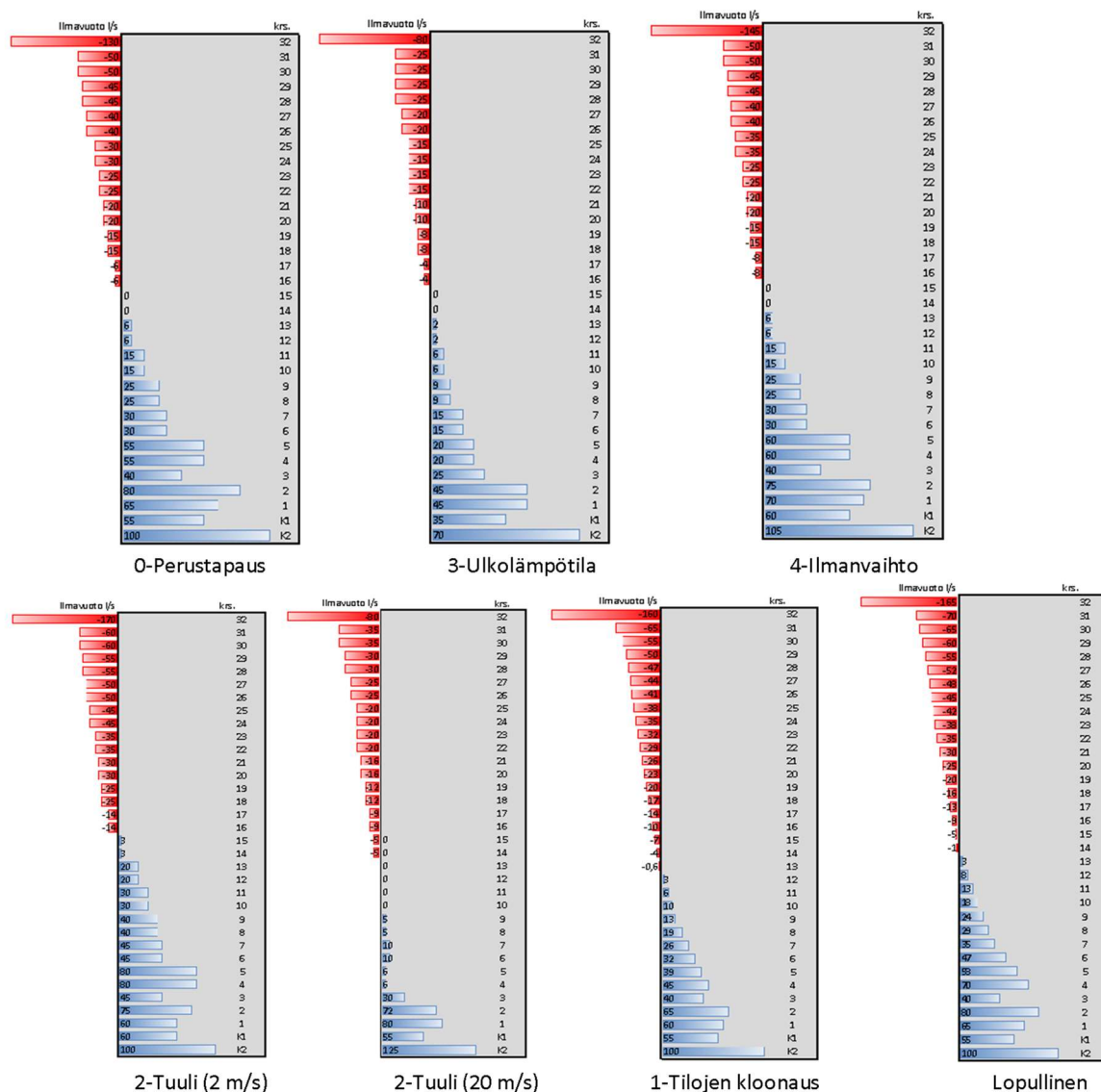
6.1 Tutkimustulokset

Alkuperäinen simuloitu Perustapaus (kpl 5) oli suhteellisen toimiva malli, ja sen tulokset vastasivat vuonna 2016 Keilaniemen A-tornista tehtyjä ilmavuototutkimuksia (kuva 9). Varsinaisia kerroskohtaisia paine-eroja ei voida ilmoittaa, koska yhtä yhtenäistä paine-eroa ei ole olemassa. Tuloksiin päätettiin kirjata kerroskohtaiset ilmavirrat. Heikkouksina huomattiin, että joka toisen kerroksen mallintaminenkin oli vielä raskas ja kuvan 9 kaltaisesta tuloksen esittämistavasta ei voida havaita tuulen vaikutusta kerroksen sisäisiin ilmavirtoihin. Työn edetessä tätä päätettiin tutkia tarkemmin.



KUVA 9. Havainnekuva aiemman painesuhdetarkastelun (vas.) (Björkroth 2016) ja tämän työn tarkastelujen tuloksista (oik.), jotka esitetään myös raporttipohjassa. Erot ilmavuotomäärissä johtuvat muuan muassa ulkovaipan eri ilmatiiveyksistä (vas. $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, m^2 ja oik. $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, m^2) ja rakennuksen geometrian muutoksista.

Kuvassa 10 on esitetty kaikkien työn aikana tehtyjen simulointivariaatioiden tulokset. Ulkolämpötilan (3) vaikutusta kokeiltiin vain simulointimallin toimivuuden todentamiseksi. Kuten tuloksista nähdään, pienenee vuotoilman määrä, kun ulkolämpötilaa nostetaan. Ulkolämpötila päätettiin pitää -26°C :ssa, koska se kuvaa pahinta mahdollista tilannetta. Mallissa, jossa ilmanvaihto (4) oli pois kytkettynä, ei huomattu vaikutusta. Tulos oli odotettu, koska ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltu tasapainoiseksi.



KUVA 10. Simulointivariaatioiden tulokset ja optimoidulla mallilla sekä arvoilla laskettu Lopullinen-tulos.

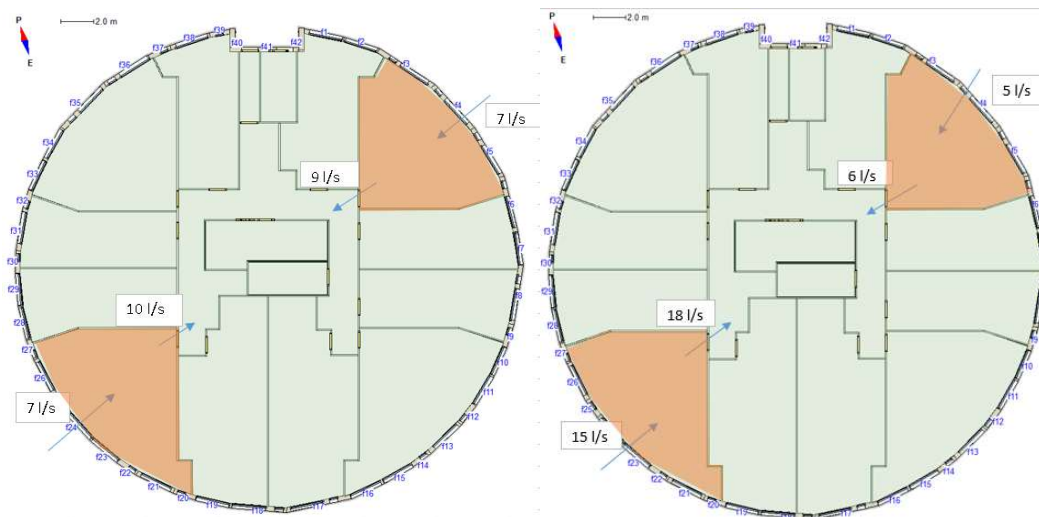
Tuulen nopeuden (2) muuttamisen todettiin vaikuttavan koko rakennuksen vuotoilmamääriin odotetusti. Jos tuulen nopeutta pienennettiin, laski vuotoilmankin määrä ja vastaavasti, jos tuulen nopeutta kasvatettiin, kasvoi vuotoilman määrä. Kuitenkin, kuten luvussa 5.2 todettiin, ei yli 10m/s puhaltavia jatkuvia tuulia useinkaan ole, ja koska mallin halutaan edustavan realistisesti vakavinta mahdollista tilannetta, suljettiin myös 2 m/s pois. Tuulen nopeuden osalta päätettiin simulointimallissa käyttää Etelä-Suomen rannikkoalueille tyypillistä talviajan keskiarvoista tuulen nopeutta 7,5 m/s (taulukko 4). Jatkossa muille rakennuksille, joille painesuhdetarkastelu tehdään, voitaisiin talvikuukausien keskiarvoinen tuu-

lennopeus ottaa taulukon 4 arvoista aluekohtaisesti tai käyttää yleisesti keskiarvoa sisämaan ja etelärannikon arvoista. Tuuliprofiili päätettiin pitää ennallaan, ja se tulisi aina uudelle kohteelle valita tapauskohtaisesti.

TAULUKKO 4. Lasketut keskiarvoiset tuulen nopeudet (m/s) talvikauduksille (Suomen Tuuliatlas 2019b.)

	Joulukuu	Tammikuu	Helmikuu	Talviajan tuulen keskinopeus (m/s)
Sisämaa	3.5	3.5	3.0	3.3
Etelärannikko	8.5	7.5	6.5	7.5
Pohjoisrannikko	8.0	8.0	7.0	7.7
Tunturi	7.5	7.5	7.5	7.5
(Sisämaa+Etelärannikko)/2				5.4

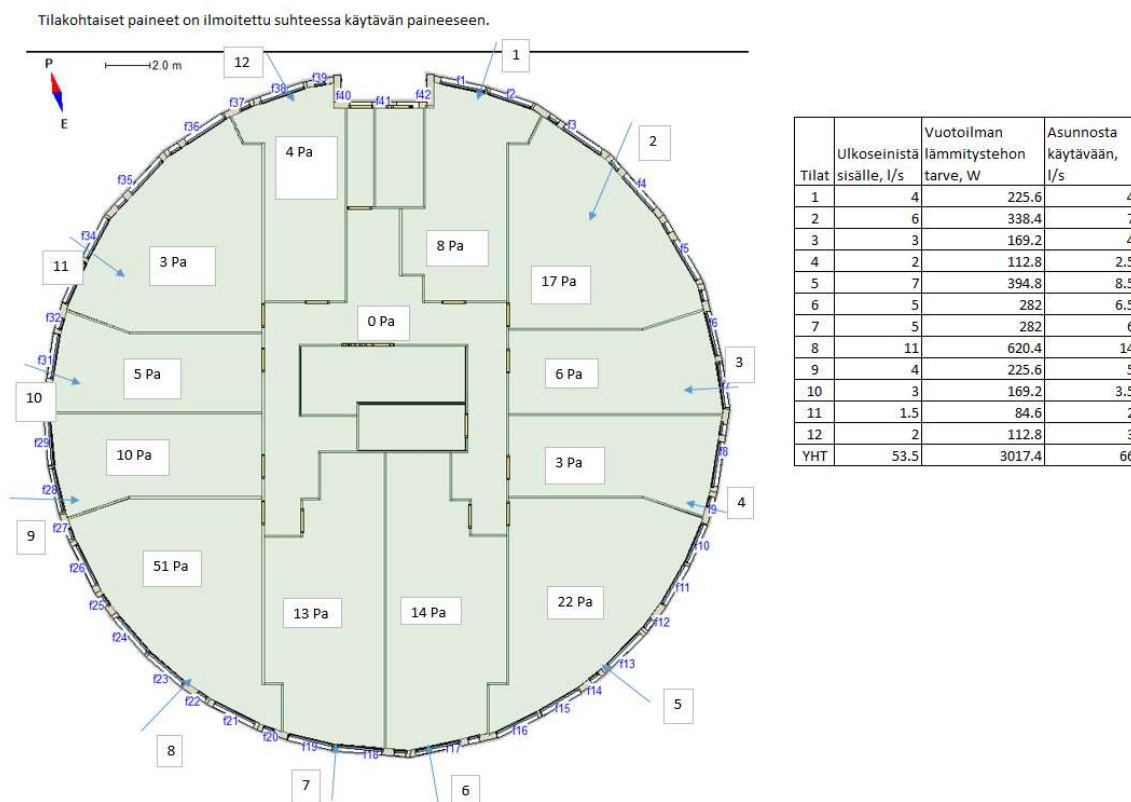
Jatkotutkimuksena tuulen vaikutusta kerroksen sisäisiin ilmavirtoihin tutkittiin 4. kerroksen tiloissa 2 m/s ja 10 m/s tuulen nopeuksissa. Havaittiin, että tuulen nopeuden ollessa 10 m/s (tai kovempi) vaikuttaa se selkeästi vuotoilmavirtojen suhteeseen eri puolilla kerrosta (kuva 11). Tulos oli kuitenkin odotettu ja teorian mukainen. Vuotoilman määrän muutokset indikoivat myös painesuhteiden muutoksesta.



KUVA 11. Rakennuksen lounas- ja koillissivuilla olevien tilojen vuotoilmavirrat 4. kerroksessa tuulen nopeuden ollessa 2 m/s (oik.) ja 10 m/s (vas.) lounaasta. Ilmavirran kasvu sisävyöhykkeellä selittyy ilman lämpölaajenemisella, kun ulkoa tuleva -26°C ilma lämpeene huoneessa 21 asteiseksi.

Koska tuulen vaikutus korkean rakennuksen painesuhteisiin ja vuotoilmavirtoihin on merkittävä, haluttiin sekini esittää dokumenttipohjassa. Lisäksi huomattiin, että huoneistokohtaisia paine-eroja on suhteellisen vaivaton mallintaa tuloksiin yhdestä kerroksesta. Dokumenttipohjassa päätettiin esittää kuvan 12 kaltainen, pahimmin vuotoilmavirrasta kärsivän kerroksen jokaisen huoneiston vuotoilmavirrat, paine-erot ovien yli sekä vuotoilmavirran lämmitystehon tarve (kuva 12). Vuotoilman lämmitystehon tarve laskettiin kaavalla 2.

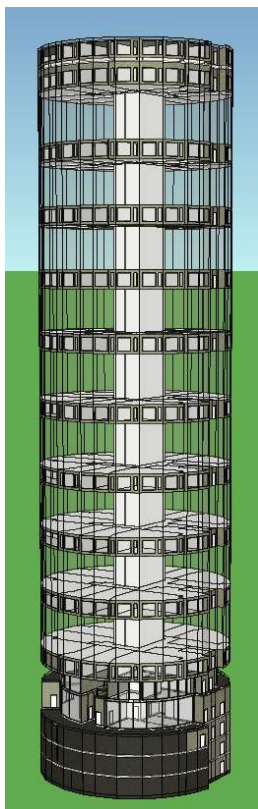
Pahimmin vuotoilmavirrasta kärsivällä kerroksella tarkoitetaan kuvan 10 kaltaisesta mallista katsottua neutraalin painetasen alapuolella olevaa kerrosta. Paras mahdollinen tilanne olisi 0 l/s mutta kuvan 10 Lopullinen-tilanteessa 4. kerroksessa on havaittu olevan 70 l/s vuotoilmavirta ja se on vakavin mallinnetuista asuinkerroksista. Paine-ero ovien yli vaikuttaa niiden käyttöön, jos se ylittää 50 Pa rajan. Kuvan 12 huoneistossa 8 tämä raja ylittyy. Paine-erosta eniten kärsivän huoneiston sijoittuminen rakennuksen lounaissivulle vahvistaa käsitystä simulointimallin toimivuudesta.



KUVA 12. Havainnekuva dokumenttipohjaan liitettävästä kuvasta, jossa esitetään pahimmin sisään vuotovasta ilmavirrasta kärsivän kerroksen vuotoilmavirrat, paine-erot ja lämmitystehon tarpeet. (Lähtötiedot: Tuulen nopeus 7,5 m/s, 225°, 4. kerros)

Tilojen kloonauksta (1) tutkittaessa huomattiin, että tulosten tarkkuus ja kerroskohtainen luotettavuus heikkenevät, jos mallinnetaan vain joka 5. kerros. Kuvassa 12 tilojen kloo-

nauksen tulokset on esitetty tilanteesta, jossa on mallinnettu vain joka 5. kerros. Huomi-
oon on otettava myös se, ettei uutta rakennusta mallinnettaessa tiedetä sen neutraalia
painetasoa yhtä tarkasti kuin tämän erimerkkirakennuksen osalta. Kloonausten osalta
päädyttiin malliin, jossa on mallinnettu kaikki erikoiskerrokset ja joka 3. samankaltainen
kerros (kuva 13). Lisäksi tutkimuksissa huomattiin, että kaksi ylintä kerrosta on hyvä mal-
lintaa, koska vaikka ylin kerros kärsii vuotoilmasta eniten, voi toiseksi ylin kerros kärsiä
myös huomattavasti. Mikäli kyseessä olisi monimuotoisempi rakennus, jossa esimerkiksi
ulkovaipan pinta-ala vaihtelisi kerroksittain paljon, tulee rakennus mallintaa tarkemmin.



KUVA 13. Simulointimallin ulkoasu, kun joka 3. peruskerros on mallinnettu sekä kaikki eri-
koiskerrokset ja kaksi ylintä kerrosta.

6.2 Tulosten esittely

Työn tavoitteena oli luoda niin sanottu toimintamalli, jonka mukaan painesuhdetarkaste-
lujia tehdään. Tarkastelut tehdään uusille korkean rakennuksen määritelmään osuville ra-
kennuksille osana rakennuslupamenettelyä. Painesuhdetarkastelu tehdään osana muita
rakennuslupaa varten tarvittavia elinkaariselvityksiä (energiaselvitys ja -todistus). Tarkas-
telut on hyvä aloittaa ajoissa, jo hankesuunnitteluvaiheessa, mikäli tarvittavia lähtötietoja
on saatavilla. Aikaisessa vaiheessa tehty tarkastelu mahdollistaa suunnitelmien muuttami-
sen, mikäli tulokset näyttävät huolestuttavilta. Yhteistyö LVI- ja rakennesuunnittelijoiden

sekä arkkitehdin kanssa projektin alusta asti on tärkeää. Toimintamalli on esitetty luvussa 6.1. ja kootusti taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Koonti toimintamallista korkearakentamisen painesuhdetarkasteluissa

Mitä?	Mistä?	HUOM!
Geometrian mallinnus	Arkkitehti kuvat	Yksinkertaistukset, kerrosten kloonaus ja KUILUT
Ilmamäärät ja lämpötilat	LVI-suunnitelmat tai ohjeavot	
Rakennuksen ilmanvuotoluku (q_{50})	Rakennesuunnitelmat	Max. 4 m ³ /(h,m ²), mieluiten todellinen tiiveys
ELA4-arvot	Suunnittelijalta tai taulukosta 2	
Tuuliprofiili ja painekeruimet	Alueen mukaan ja AIVC	
Tuulen nopeus	Taulukko 4	Suuntaus aina 225° (lounas)
Mitoituslämpötila	-26°C	
Raportointi; ilmanvuoto, paine-erot, tehon tarve	IDA ICE:n simulointituloksista	

Tulosten visuaalista mallintamista varten luotiin Excel-työkalu, johon on kerätty ohjeita koskien mallinnusta sekä kaavat, joilla numeeriset arvot saadaan interpoloitua jokaiselle kerrokselle ja mallinnettua sekä lämmitystehon tarve lasketaan. Työkalusta saatavat visuaaliset tulokset on esitetty kuvassa 9 (oik.) ja 12. Varsinaiset tarkastelun lähtötiedot, oletukset ja tulokset on esitetty dokumenttipohjassa, joka on liitteenä 1. Dokumenttipohjan Johtopäätöksiä kohtaan on tarkoitus kirjoittaa havaintoja tuloksista sekä mahdollisia parannusehdotuksia, joilla vuotoilmavirtoja voitaisiin pienentää tutkitussa rakennuksessa. Liitteessä 2 on esitetty esimerkkirakennuksen lähtötiedot ja tulokset dokumenttipohjassa.

6.3 Tulosten analysointi

Työn aikaiset tutkimukset keskittyivät parhaan toimintamallin selvittämiseen. Ensimmäiseksi haasteeksi muodostui IDA ICE:n kapasiteetin rajallisuus. Jo geometristä mallia luotaessa jouduttiin pohtimaan merkityksellisiä tiloja ja kuiluja. Yksinkertaistamisen vaikutuksia ei varsinaisesti päästy tutkimaan kovinkaan yksityiskohtaisesti vaan ajatustyö perustui teoriaan. Lisäksi alun haasteita oli lähtötietojen puute, koska rakennuksen suunnitelmia ei ole vielä lyöty lukkoon. Lähtötietojen, kuten ilmanvuotoluvun, tilojen ilmamäärien

ja lämpötilojen, osalta käytettiin pitkälti ohjearvoja lainsäädännöstä. Näistä johtuen saadut tulokset eivät ole rakennukselle todenmukaisia eikä niitä voida käyttää varsinaista rakennuslupaa hakiessa.

Ilmavuotoaukkojen (ELA₄) arvot tuottivat ongelmia. Niistä ei ollut valmista listausta Suomen lainsäädännössä ja muut lähteet olivat maksullisia. Tästä johtuen työssä tyydyttiin käyttämään toissijaisesta lähteestä peräisin olevia lukuja. Työssä ei myöskään otettu huomioon huoneistojen ovien mahdollisia postiluukkuja ja sitä, onko eteisessä mahdollisesti tuplaovi. Lisäksi mahdollisten yksilöllisesti rakennukselle mitattujen tuulen painekertoimien käyttö todettiin hankalaksi ja työlääksi. Kuitenkin niiden suuren merkityksen kannalta olisi oleellista tutkia IDA ICE:n automaattisesti laskemien painekertoimien oikeellisuutta.

Suurimman pohdinnan aiheen muodostivat kuitenkin mahdollisimman todenmukaisten sääolosuhteiden mallintaminen simuloinneissa. Simulointeja varten jouduttiin luomaan yksilöllinen säädädata, jolla voidaan mallintaa halutut parametrit yhden päivän aikana. Lisäksi se, ettei IDA ICE -ohjelmasta ollut saatavilla yksinkertaisesti esimerkiksi ulkovaipan yli vaikuttavaa paine-eroa, aiheutti pohdintaa. Siksi tuloksissa päätettiin esittää ilmanvuotovirtoja. Niille ei kuitenkaan löydetty niin sanottuja raja-arvoja, milloin ilmavuoto olisi vielä harmiton ja milloin hälyttävä.

Raja-arvojen puuttuessa keskityttiin vielä uudelleen paine-erojen mallintamiseen. Niiden tutkiminen vain eniten vuotoilmasta (ulkoa sisälle) kärsivässä kerroksessa osoittautui tehokkaaksi tavaksi ja se kuvaa pahinta mahdollista tilannetta, joka rakennuksen huoneistoissa voi vallita. Lämmitystehon tarve laskettiin vuotoilmavirroista pahimman kerroksen ulkovyöhykkeiden tiloille, jotta saataisiin kuva niiden lisälämmitystarpeesta.

Työn tulokset ovat teoriaa vastaavia, joten voidaan olettaa, että tämän kaltainen ja tämän tarkkuustason simulointimalli toimii myös uusien rakennuksien tutkittaessa. Rakennuksen erikoisesta geometriasta huolimatta se soveltui mallirakennukseksi hyvin. Pohdinnan aihe antoi kuitenkin se, kuinka paljon vaikutusta perusasuinikerroksen käyttämisellä jokaisessa kerroksessa on. Korkeissa rakennuksissa voidaan olettaa olevan myös niin sanottuja tekniikkakerroksia, joiden huonekorkeus, ilmanvaihto sekä ilmatiiveys eivät aina vastaa muiden kerroksien arvoja. Lisäksi hissiovien todelliset ilmanvuotoluvut ovat erittäin oleellinen tieto, joka jatkossa tulee selvittää, koska hissikuilu osoittautui merkittävimmäksi hormivaikutuksesta kärsiväksi kuiluksi.

Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen ollessa nimensä mukaan ohje, on sen tarkoitus vain ohjata tutkimaan tarkasteluja vaativia seikkoja ja haasteita. Näin ollen myös sen ohjeistamat tarkastelut ovat hyvin tulkinnanvaraisia. Tämän työn tulokset vastaavat ohjeen mainitsemiin tarkasteluihin sekä kysymyksiin ja simuloinneissa on otettu kaikki

oleelliset asiat huomioon. Lisäksi työn aikana toimintamalli on optimoitu mahdollisimman kevyeksi ja yksinkertaisesti, tulosten laatua vaarantamatta. Tutkimusten aikana on onnistuttu myös löytämään suuntaa antavia raja-arvoja, jolloin hormonivaikutuksen voidaan katsoa olevan merkittävä ja vaikuttavan asumisviihtyvyyteen.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli luoda toimintamalli painesuhdetarkasteluille korkeissa rakennuksissa sekä dokumenttipohja, joka on Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen mukainen. Tarkastelu tehtiin IDA ICE -simulointiohjelmalla ja työn aikainen tutkimus keskittyi toimintamallin optimoimiseen. Työn liikkeelle pannut tekijä on korkean rakentamisen rantautuminen Suomeen ja sen kiihtyvä yleistyminen. Korkeissa rakennuksissa on havahduttu erilaisiin haasteisiin, jotka johtuvat korkeudesta ja kylmästä ilmastosta. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje on luotu, koska nämä korkean rakentamisen haasteet on tiedostettu ja niihin halutaan kiinnittää huomiota.

Työn tuloksena on toimintamalli ja dokumenttipohja, joiden mukaan hormivaikutuksen aiheuttamia ilmavirtoja ja painesuhteita voidaan tutkia ja havainnollistaa korkeissa rakennuksissa. Tarkastelut tehdään rakennuslupaa varten, mutta tuloksista saadaan tärkeää informaatiota myös muiden alojen suunnittelijoille ja näin voidaan varmistua korkean rakennuksen suunnittelun onnistumisesta. Toimintamalli ja dokumenttipohja ovat tavoitteiden mukaisia ja vastaavat Korkean rakentamisen rakentamistapaohjetta.

Huomattavaa oli se, kuinka paljon hormivaikutuksesta, sen haasteista ja lieventämisestä oli jo tutkimustietoa. Kuitenkaan vastaavanlaista rakennuslupaa varten tehtävää toimintatapaa ei ollut ja joitakin hormivaikutuksen mallintamisen kannalta oleellisia lähtötietoja oli vaikea saada. Tuloksien oikeellisuuden kannalta on tärkeää, että käytettävissä on suunnitellut arvot esimerkiksi ilmanvuotoarvojen ja ilmanvaihdon osalta. Lisäksi uutta rakennusta mallinnettaessa on mietittävä tarkkaan hormivaikutuksen kannalta oleellisten rakenteiden, kuten kuilujen, mallintaminen.

Vaikka työn tuloksia voidaan pitää hyödyllisinä ja tavoitteiden mukaisina, pitää huomioida, että kyseessä on ensimmäinen tämän kaltainen tarkastelumalli. Sen kehittäminen on jatkuva prosessi ja erityisesti alkuvaiheessa on tarkkailtava sen toimivuutta erilaisissa rakennuksissa. Huomioitavaa on myös se, että esimerkkirakennus on geometrialtaan hyvin perinteistä poikkeava. Kehitettäviä seikkoja ovat muun muassa tulosten nopeampi ja automatisoidumpi kokoaminen, inhimillistenvirheiden ehkäisemiseksi.

Selkeinä jatkotutkimuksia vaativina kohtina voidaan pitää tuulen aiheuttamia painekertoimia, ilmavuodon raja-arvon määrittämistä sekä vuotoilmavirran vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Painekertoimien tutkiminen vastaisi kysymyksiin IDA ICE:n automaattisesti laskemien kertoimien toden mukaisuudesta, mutta tarkastelu olisi yksinkertaisempi toteuttaa yksinkertaisemman mallisessa rakennuksessa. Työn tuloksena on kuitenkin vasta ensimmäinen versio painesuhdetarkastelun toimintamallista ja sen lopullinen

muoto tulee varmasti muuttumaan, kun tarkasteluja on tehty enemmän ja niiden tuloksista ryhdytään keskustelemaan.

LÄHTEET

Aatsalo, J. 2018. Maakunnissa ja kasvukeskuksissa vireillä yli kymmenen korkean rakentamisen hanketta [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <https://www.rakennus-lehti.fi/2018/02/maakunnissa-ja-kasvukeskuksissa-vireilla-yli-kymmenen-korkean-rakentamisen-hanketta/>

Björkroth, M. 2016. Keilaniemi Towers: Ilmavuodot [viitattu 7.4.2019]. Saatavissa Sweco Talotekniikka Oy:n tietokannassa.

CTBUH 2019. Council on tall buildings and urban habitat. CTBUH Height criteria [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <http://ctbuh.org/criteria/>

Edilex 2019. Rakentamismääräykset [viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>

EQUA 2018. IDA Indoor Climate and Energy [viitattu 7.4.2019]. Saatavissa: <https://www.equa.se/fi/ida-ice>

FINVAC ry 2017. Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen [viitattu 28.4.2019]. Saatavissa: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/finvac.kotisivukone.com/tiedostot/Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/finvac.kotisivukone.com/tiedostot/Opas%20asuinrakennusten%20ilmanvaihdon%20mitoitukseen.pdf)

Hokkanen, T. 2013. Espoon korkean rakentamisen periaatteet -selvitys. Espoon kaupunki [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: [https://www.espool.fi/fi-FI/Asuminen_ja_ymparisto/Kaavoitus/Espoon korkean rakentamisen periaatteet \(33440\)](https://www.espool.fi/fi-FI/Asuminen_ja_ymparisto/Kaavoitus/Espoon_korkean_rakentamisen_periaatteet_(33440))

Ilmatieteen laitos 2019. Havaintosuureet: Mitä havainnoimme? [viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintosuureet>

Karlberg, P. 2017. Norjassa nousee taas huippukorkea puupilvenpiirtäjä [viitattu 3.3.2019]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/rakennus/norjassa-nousee-taas-huippukorkea-puupilvenpiirtaja-betonia-tarvitaan-vain-ylimmissa-kerroksissa-6679948>

Kokkonen, E. & Henttinen, K. 2019. Keilaniemen tornitalot, LVI-suunnittelu: simuloinnit [viitattu 5.4.2019]. Saatavissa Sweco Talotekniikka Oy:n tietokannassa.

Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018. Helsingin kaupunki [viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTAPAOHJE_OHJEKORTIT.pdf

Maankäyttö- ja rakennuslaki 1999/132.

MagiCAD 2019. MagiCAD Room [viitattu 7.4.2019]. Saatavissa: https://www.magicad.com/fi/mc_software/magicad-room/#ominaisuudet-autocadille

Nybergh, C. 2014. Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa [viitattu 9.3.2019]. Saatavissa Sweco Talotekniikka Oy:n tietokannassa.

Oulun kaupunki 2014. Korkean rakentamisen selvitys [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <https://www.ouka.fi/documents/12610409/18292571/Korkea-rakentaminen-Oulussa-selvitys-10062014-KH.pdf/dfa8f5ae-e958-4901-8102-9e88c3342eba>

Wikipedia 2018. Pilvenpiirtäjät [viitattu 3.3.2019]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Pilvenpiirt%C3%A4j%C3%A4>

Ranta-aho, I. 2016. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa [viitattu 6.3.2019]. Saatavissa Sweco Talotekniikka Oy:n tietokannassa.

Rantapallo 2016. Dubai ei luovu maailman korkeimmasta rakennuksesta [viitattu 3.3.2019]. Saatavissa: <https://www.rantapallo.fi/matkailu/dubai-ei-luovu-maailman-kokeimmasta-rakennuksesta-uusi-pilvenpiirtaja-rakenteilla/>

RDH Building Engineering Ltd. 2013. Air leakage control in multi-unit residential buildings [viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: <https://rdh.com/wp-content/uploads/2014/04/Air-Leakage-Control-in-Multi-Unit-Residential-Buildings.pdf>

RED 2019. Air leakage metrics [viitattu 7.4.2019]. Saatavissa: <http://www.residentialenergydynamics.com/REDCalcFree/Help/AirLeakageMetrics.aspx>

Sarc Architects 2019. Keilaniemen tornit [viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://sarc.fi/reference/keilaniemen-tornit/>

Siironen, S. 2018. Tällainen jätti on suunnitteilla Espoon Keilaniemeen [viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10157369>

Suomen Tuuliatlas 2019a. Tuuliatlas – tuulitiedot Suomen kartalla [viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Suomen Tuuliatlas 2019b. Tuulisuus Suomessa [viitattu 7.4.2019]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/#>

Sweco 2019. Talotekniikka [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <https://www.sweco.fi/palvelumme/talotekniikka/>

Swegon Academy 2011. Selected topics in high rise mechanical design [viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: <https://www.swegonairacademy.com/wp-content/uploads/2012/01/Chris-Pal-110214.pdf>

Turun kaupungin ympäristötoimiala 2017. Yleiskaava 2029. Turun korkean rakentamisen selvitys [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/turun_korkean_rakentamisen_selvitys_id_74071.pdf

Uudenmaan lämpökuvaus 2013. Tiiveysmittaus, ilmanvuotoluku, energialuokitus, tiiveyden merkitys ja määritykset [viitattu 9.3.2019]. Saatavissa: <http://www.uudenmaanlampokuvaus.fi/16>

Uusi Suomi 2013. Ruotsissa alkoi ”pilvenpiirtäjien taistelu” [viitattu 3.3.2019]. Saatavissa: <https://www.uusisuomi.fi/ulkomaat/61796-ruotsissa-alkoi-pilvenpiirtajien-taistelu-225-metria-75-kerrosta>

YM asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017.


YM asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017.


Ympäristöministeriö 2019. Suomen rakentamismääräyskokoelma [viitattu 20.2.2019].

Saatavissa: <http://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>

LIITTEET

Liite 1. Dokumenttipohja.

Painesuhdetarkastelun lähtötiedot		SWECO 
Rakennuskohde		
Nimi		
Osoite		
Rakennuksen käyttötarkoitus		
Muoto		
Kuvaus	Perustuu arkkitehdin suunnitelmiin (XX.XX.2019)	
Mallin yksinkertaistukset		
Rakenne		
Rakennetyyppi	Ohjeavot	RakMk C3
Ilmanvuotoluku (q50):		m ³ /(h,m ²)
Vuotoaukkojen ELA4-arvot	m ² /ovi	
	<ul style="list-style-type: none"> - Ulko-ovi - Väliovi - Hissin ovi - Pyöröovi 	
Ovien aukiolo:	Aina kiinni	
Talotekniikka		
Ilmanvaihtojärjestelmä	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä	
	<ul style="list-style-type: none"> - Vaikutusalue - Ilmämäärä - Sisäänpuhalluslämpötila 	
		l/s,m ² °C
Kiilujen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät		
Muut järjestelmät	Ei muita tilaan vaikuttavia järjestelmiä	
Laskentatyökalu ja simulointimallin kuvaus		
IDA Indoor Climate and Energy 4.8		
Simulointimalli		
	<ul style="list-style-type: none"> - Ulkolämpötila - Tuulen nopeus - Suunta - Tuuliprofiili - Paineerotimet 	
		°C m/s °

Painesuhdetarkastelun tulokset		SWECO 
Rakennuskohde		
Nimi		0
Osoite		0
Rakennuksen käyttötarkoitus		0
Kuva tuloksista		
Johtopäätöksiä		

Liite 2. Esimerkkirakennuksen painesuhdetarkastelujen tulokset dokumenttipohjassa.

Painesuhdetarkastelun lähtötiedot		
Rakennuskohde		
Nimi	A-torni	
Osoite	Keilaniementie 2, 02150 Espoo	
Rakennuksen käyttötarkoitus	Asuinkerrostalo	
Muoto		
Kuvaus	Perustuu arkkitehdin suunnitelmiin (XX.XX.2019)	
Mallin yksinkertaistukset	Huoneistot mallinnettu yhtenä tilana ja asuinkerroksista joka kolmas kerros	
Rakenne		
Rakennetyypit	Ohjeavot	RakMk C3
Ilmanvuotoluku (q50):	0,50	m3/(h,m2)
Vuotoaukkojen ELA4-arvot	m2/ovi	
- Ulko-ovi	0,0090	
- Väliovi	0,0012	
- Hissin ovi	0,0187	
- Pyöröovi	0,0015	
Ovien aukiolo:	Aina kiinni	
Talotekniikka		
Ilmanvaihtojärjestelmä	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä	
- Vaikutusalue	Kerroskohtainen	
- Ilmamaara	0,5	l/s,m ²
- Sisäänpuhallustempötila	20	°C
Kiulujen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät	Hissikuiluissa ei jäähdytystä eikä lämmitystä	
Muut järjestelmät	Ei muita tilaan vaikuttavia järjestelmiä	
Laskentatyökalu ja simulointimallin kuvaus		
IDA Indoor Climate and Energy 4.8		
Simulointimalli		
- Ulkolämpötila	-26	°C
- Tuulen nopeus	7.5	m/s
- Suunta	225	°
- Tuuliprofiili	Meri (ASHRAE 1993)	
- Painekertoimet	AIVC suojaamaton	

Painesuhdetarkastelun tulokset																																															
Rakennuskohde																																															
Nimi	A-torni																																														
Osoite	Keilaniementie 2, 02150 Espoo																																														
Rakennuksen käyttötarkoitus	Asuinkerrostalo																																														
Yli 50Pa paine-ero vaukeuttaa huoneistojen ovien avaamista																																															
Kuva tuloksista																																															
Ilmavuoto l/s	ks.																																														
Tilakohtaiset paineet on ilmoitettu suhteessa käytävän paineeseen.																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ulkoseinistä</th> <th>Vuotoilmamäärä</th> <th>Asuimesta</th> </tr> <tr> <th>Tilat (osalle, U)</th> <th>l/s, W</th> <th>käytävään, l/s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>225,6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>396,4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> <td>396,4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td>112,8</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>7</td> <td>396,4</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>5</td> <td>392</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>5</td> <td>392</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>11</td> <td>439,6</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>4</td> <td>225,6</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>8</td> <td>396,4</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>1,5</td> <td>84,6</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>2</td> <td>112,8</td> </tr> <tr> <td>Yhteensä</td> <td>55,5</td> <td>3037,4</td> </tr> </tbody> </table>			Ulkoseinistä	Vuotoilmamäärä	Asuimesta	Tilat (osalle, U)	l/s, W	käytävään, l/s	1	4	225,6	2	6	396,4	3	8	396,4	4	2	112,8	5	7	396,4	6	5	392	7	5	392	8	11	439,6	9	4	225,6	10	8	396,4	11	1,5	84,6	12	2	112,8	Yhteensä	55,5	3037,4
Ulkoseinistä	Vuotoilmamäärä	Asuimesta																																													
Tilat (osalle, U)	l/s, W	käytävään, l/s																																													
1	4	225,6																																													
2	6	396,4																																													
3	8	396,4																																													
4	2	112,8																																													
5	7	396,4																																													
6	5	392																																													
7	5	392																																													
8	11	439,6																																													
9	4	225,6																																													
10	8	396,4																																													
11	1,5	84,6																																													
12	2	112,8																																													
Yhteensä	55,5	3037,4																																													
Johtopäätöksiä																																															
Mitoitus tilanteessa neutraalin painetasen alapuolella olevista perusasuinkerroksista vakavimmin vuotoilmavirroista kärsii 4. kerros. Siitä tutkittiin tarkemmin huoneisto kohtaiset vuotoilmavirrat sekä paine-erot.																																															
Mitoitustilanteessa (pahin mahdollinen tilanne) tuulen puoleisessa huoneistossa ovien sulkeminen voi tuottaa ongelmia, koska paine ero käytävän ja huoneiston välillä on yli 50Pa.																																															