

Justus Kortelainen

KORKEIDEN RAKENNUSTEN LVI-SUUNNITTELU

Opinnäytetyö

Talotekniikka (LVI)

Insinööri (AMK)

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Justus Kortelainen
Työn nimi	Korkeiden rakennusten LVI-suunnittelu
Toimeksiantaja	Granlund Kuopio Oy
Vuosi	2022
Sivut	52 sivua
Työn ohjaaja(t)	Tero Lahikainen, XAMK. Tuomas Lehikoinen, Ins., Granlund Kuopio Oy

TIIVISTELMÄ

Suurten kaupunkien kasvaessa on Suomessakin nykypäivän trendinä rakentaa yhä korkeampia kerrostaloja. Rakennuskorkeus vaikuttaa oleellisesti kaikilla suunnittelualoilla ja haastaa suunnittelijat matalasta rakentamisesta poikkeavilla toteutusmenetelmillä. Opinnäytetyössä selvitettiin korkeassa rakentamisessa huomioitavia erityispiirteitä talotekniikan ja LVI-suunnittelijan näkökulmasta. Työn konkreettisena tavoitteena oli selvittää erityistä huomiointia vaativat asiat ja koota ne selkeään muistilistamaiseen muotoon tilaajayrityksen käyttöön. Vaatimusten selvittäessä työssä pystyi myös kartoittamaan yrityksen kykyä ryhtyä korkean rakentamisen hankkeen LVI-suunnitteluun. Opinnäytetyö suoritettiin pääasiassa tutkimalla kirjallisuuslähteitä ja haastatteleamalla alan asiantuntijoita.

Korkealle rakennettaessa rakennukseen alkaa vaikuttaa poikkeavat olosuhteet, jotka vaikuttavat myös LVI-suunnitteluun. Etenkin kylmällä ilmalla korkeassa rakennuksessa korostuu termiset paine-erot eli hormivaikutus. Hormivaikutuksen vuoksi rakennus käyttäytyy savupiipun lailla, ja vuotoilma pyrkii virtaamaan pystykuiluja pitkin rakennuksen yläosaan tehden alaosasta alipaineisen ja yläosaan ylipaineisen. Korkealla vaikuttavan kovan tuulen myötä hormivaikutus vain voimistuu. Hormivaikutusta pyritään ensisijaisesti hallitsemaan rakenteellisilla menetelmillä, eli tiiviydellä ja rakenteiden osastoinnilla, mutta myös talotekniset menetelmät ovat mahdollisia.

Hormivaikutus, voimakkaampi tuuli ja puuttuva varjostus vaikuttavat lämmitys- ja jäähdytystehontarpeisiin ja rakennuksen painesuhteisiin. Poikkeuksellisten painesuhteiden myötä myös ilmanvaihtojärjestelmien toteutusmenetelmät on pidettävä matalina. Poikkeukselliset olosuhteet huomioidaan simuloimalla dynaamisella monivyöhykelaskentamallilla ja ilmanvaihdon seinäpuhalluksen hyväksyntä voi edellyttää CFD-simulointia.

Korkeuden kasvaessa lämmitys-, jäähdytys- ja käyttövesijärjestelmien vesipatsaat kasvavat, ja verkostojen alaosaan muodostuu yhä suurempi paine. Paineen hallitsemiseksi verkostot tulee katkaista jakamalla ne pystyvyöhykkeisiin. Vesijohtoverkon paine ei riitä ylimpiin kerroksiin, joten painetta on korotettava paineenkorotusasemalla. Viemäröintijärjestelmissä huomiota on kiinnitettävä jatkuvaan tuuletukseen.

Asiasanat: korkea rakentaminen, korkea asuinkerrostalo, LVI-suunnittelu, vyöhykejako, hormivaikutus, simulointi

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Justus Kortelainen
Thesis title	HVAC Design of a high-rise building
Commissioned by	Granlund Kuopio Oy
Time	2022
Pages	52 pages
Supervisor	Tero Lahikainen, XAMK. Tuomas Lehikoinen, Ins., Granlund Kuopio Oy

ABSTRACT

As cities grow bigger the current trend in Finland is to build even higher buildings. Building height has a significant impact on all design fields and it challenges designers with methods different from low-rise construction.

In the thesis, the special features to be considered in high-rise construction were investigated from the point of view of an HVAC-designer. The concrete goal of the thesis was to find out the issues that require special attention and compile them into a clear checklist-like form for the customer company to use. While investigating the requirements it was possible to map the company's ability to undertake an HVAC-design project of a high-rise building. The thesis was done by researching literature sources and interviewing specialists.

High-rise buildings are affected by unusual conditions which impact the HVAC-design. Especially in cold climate in a tall building, the thermal pressure differences that is the stack effect are accentuated. Because of the stack effect the building acts like a chimney, and leakage air tends to flow along the vertical shafts to the upper part of the building, making the lower part underpressurized and the upper part pressurized. With the strong wind acting at high altitudes, the stack effect only intensifies. The primary aim is to control the stack effect with structural methods i.e., tightness and compartmentalization of structures, but HVAC-methods can also be used.

Stack effect, stronger wind and missing shading affect the heating and cooling needs and the building's pressure relations. Due to the exceptional pressure conditions, the height differences of ventilation systems must also be kept low. Exceptional conditions are considered by simulating with a dynamic multi-zone calculation model, and the approval of ventilation exhausted through the exterior wall may require computational fluid dynamics -simulation.

As the building height increases, the water columns of the heating, cooling and domestic water systems grow, and the lower part of the networks builds up hydrostatic pressure. To control the pressure, the networks should be divided into vertical zones. The pressure of the water supply network is not often sufficient for the upper floors so the pressure must be increased with a pressure boosting station. In drainage systems continuous ventilation must be always taken care of.

Keywords: high-rise construction, high-rise residential building, HVAC-design, zoned systems, stack effect, simulation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	7
2.1	Korkea rakentaminen.....	7
2.2	Lainsäädäntö, asetukset ja direktiivit	8
3	LÄMMITYS- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT	10
3.1	Tehontarvelaskenta	10
3.2	Paineiden hallinta nestejärjestelmissä	12
3.3	Vyöhykejako	15
3.3.1	Vyöhykekohtaiset pystyrungot	16
3.3.2	Korkeapainenusu.....	17
3.3.3	Vyöhykekohtaiset välilämmönsiirtimet	18
3.4	Paisuntajärjestelmät	19
3.5	Putkiston lämpölaajeneminen ja kannakointi	21
4	KÄYTTÖVESIJÄRJESTELMÄT	23
4.1	Paineenkorotus ja -alennus	23
4.2	Vyöhykejako	26
4.2.1	Vyöhykkeittäin jaettu paineenkorotus.....	27
4.2.2	Paineenkorotus kerroksissa.....	28
4.3	Eristys.....	30
5	VIEMÄRIJÄRJESTELMÄT	31
5.1	Pystyviemäri	32
5.2	Virtauksen optimointi viemärijärjestelmässä	34
6	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT	35
6.1	Kerrostalon ilmanvaihtoratkaisut.....	36
6.1.1	Keskitetty ja kerroskohtainen ilmanvaihto	36
6.1.2	Hajautettu ilmanvaihto	38
6.2	Painesuhteet.....	39

6.3	Hormivaikutus.....	40
6.4	Tuuli.....	43
7	TEKNISET TILAT	46
8	TUTKIMUSMENETELMÄT	47
9	YHTEENVETO	48
10	POHDINTA.....	50
	LÄHTEET.....	53
	KUVALUETTELO	

1 JOHDANTO

Tämän selvitysluontoisen opinnäytetyön tarkoituksena on koota yhteen lämmitys-, käyttövesi-, viemäri- ja ilmanvaihtojärjestelmien erityispiirteet korkeassa rakentamisessa. Korkean rakentamisen suunnittelussa erityistä huomiota vaativat asiat selvitetään ja kootaan yhteen selkeäksi muistilistaksi, jotta ne ovat tarvittaessa helposti saatavilla tilaajaorganisaation käyttöön. Työn tilaajana toimii Granlund Kuopio Oy, joten työn näkökanta keskittyy osittain Kuopion alueeseen. Yhtiössä työskentelee noin 120 henkeä, joista noin 50 työskentelee LVI-tekniikan parissa.

Työ rajataan käsittelemään LVI-tekniikan mekaanisia ominaisuuksia, ja esimerkiksi automaatiota, palotekniikkaa tai savunpoistoa työssä ei käsitellä ollenkaan. Selvityksessä käsitellään pääasiassa uudiskohteita, joissa LVI-tekniikka on oleellisena osana rakennuksen toimivuutta koko korkeudella. Näitä ovat esimerkiksi asuin- ja liikekäytössä olevat kerrostalot ja hotellit. Korkeiksi rakennuksiksi luokiteltavia ovat usein myös kirkot, vesitornit ja jotkin maamerkit, kuten Näsinneula ja Puijon torni. Näiden kaltaisia korkeita rakennuksia tutkimuksessa ei käsitellä. Työssä huomioidaan myös lainsäädännön näkökulma, tarvittavat pätevyudet ja vaatimukset sekä suurten rakennuttajaorganisaatioiden asettamat vaatimukset korkean rakentamisen LVI-suunnitteluun.

Korkean rakentamisen LVI-suunnittelussa hyödynnetään pääasiassa samoja periaatteita kuin suunnittelussa yleisestikin, mutta korkeuden myötä voimistuvat fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat rakennuksen teknisiin vaateisiin suunnittelun eri osa-alueilla. Työssä pyritään kartoittamaan korkean rakentamisen LVI-suunnittelussa ja rakentamisessa ennalta havaittuja haasteita, jotka poikkeavat normaalista LVI-suunnittelusta. Konkreettisena tavoitteena on koota tilaajaorganisaatiolle sisäinen suunnitteluohje korkean rakentamisen LVI-suunnittelua varten.

Tämän opinnäytetyön aihealueen asioita tullaan tarvitsemaan tulevaisuuden rakentamisessa yhä enemmän korkean rakentamisen yleistyessä Suomessa. Aiheesta on jo tehty muutamia tutkimuksia, mutta kokemus korkeasta rakentamisesta on Suomessa vielä hyvin vähäistä ja erityisesti korkeaan rakentamiseen tarkoitettua tekniikkaa kehitetään jatkuvasti.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

2.1 Korkea rakentaminen

Kaupunkien kasvaessa ja laajentuessa on nykypäivän kasvavana trendinä rakentaa yhä korkeampia rakennuksia. Tähän vaikuttavat muun muassa tonttien vähyys ja suuri kysyntä tiloille keskeisillä sijainneilla, kuten suurten kaupunkien keskustoissa. Nykypäivän rakennusmenetelmillä on mahdollista toteuttaa suuria ja korkeita rakennuksia, mutta rakennuskorkeuden kasvaessa tulee lisää huomioitavia asioita kaikilla rakentamisen ja suunnittelun osa-alueilla. [1, s. 5–6.]

Tornitalolle eli korkealle rakennukselle tyypillistä on leveyttä selkeästi korkeampi muoto, mutta kuitenkin sen korkeudelle ei ole yhtä absoluuttista määritelmää. Määritelmä vaihtelee paljon riippuen rakennuksen ympäristöstä, sillä yleensä korkeutensa puolesta ympäristön rakennuskannasta poikkeava rakennus luokitellaan korkeaksi. Muun muassa Yhdysvalloissa, Aasiassa ja Lähi-Idässä on jo pitkään rakennettu paljon korkeampia rakennuksia kuin muualla maailmassa. Suuren vaihtelun myötä rakennukset on jaoteltu kansainvälisesti korkeisiin (50–300 metriä), ”superkorkeisiin” (≥ 300 metriä) ja ”megakorkeisiin” (≥ 600 metriä) [2.] Koko Suomen nykyinen rakennuskanta kuuluu luokituksen matalimpaan luokkaan, ja siinäkin asteikon alkupäähän. Tällä hetkellä Suomen korkein kerrostalo on vuonna 2019 Helsingin Kalasatamaan valmistunut Majakka, joka on 134 metriä korkea 35-kerroksinen asuinrakennus [3].

Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto määrittelee korkeaksi rakennukseksi ympäröivään rakennuskantaan verrattuna poikkeuksellisen korkeat ja kauas näkyvät rakennukset, eli käytännössä 16-kerroksiset ja sitä korkeammat rakennukset [4]. Esimerkiksi Kuopiossa vuoden 2009 arkkitehtuurisen määritelmän mukaan korkealla rakentamisella tarkoitetaan yli 8-kerroksisia rakennuksia [5, s. 4]. Edellä mainittu raja kuitenkin on ajalta, jolloin tuon korkuisia rakennuksia oli huomattavasti vähemmän kuin nykyään.

2.2 Lainsäädäntö, asetukset ja direktiivit

Lainsäädännön näkökulmasta kaikkea rakentamista Suomessa ohjaa ja säätelee maankäyttö- ja rakennuslaki [6]. Lain pohjalta on koottu rakentamista koskevat säännökset ja ohjeet, jotka käytännössä pohjautuvat 2017 kumotuun rakentamismääräyskokoelmaan. Ympäristöministeriön asetukset ottavat todella suppeasti kantaa korkeaan rakentamiseen, mutta muutamissa asiakirjoissa yli 16-kerroksisen rakennuksen mainitaan olevan poikkeuksellisen korkea. Tähän rajaan viitataan muutamissa ympäristöministeriön asetuksissa, Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeessa sekä aiemmin mainitussa Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston määritelmässä [4; 6; 7, s. 8]. Yleisellä kerroskorkeudella 16 kerrosta tarkoittaa noin 50–55 metrin korkuista rakennusta. Ympäristöministeriön rakentamismääräysten sisältöä voidaan soveltaa myös edellä mainittua rajaa korkeammissa rakennuksissa, mutta lupaviranomainen käsittelee sitä korkeammat rakennukset poikkeamisinä määräyksistä, ja ne vaativat lähes aina erillisselvityksiä käytetyistä ratkaisuista [7; 8, s. 2].

Useat suuremmat kaupungit Suomessa ovat julkaisseet ohjekortteja korkean rakentamisen rakentamistapaohjeiksi. Näistä ohjeista kattavin on Helsingin kaupungin vuonna 2018 julkaisema rakentamistapaohje, joka on laadittu selvittämään lisäselvityksiä ja aikataulutusta korkean rakentamisen eri vaiheissa. Ohjekorteissa käsitellään erikseen yleiset-, rakenne-, akustiikka-, LVI- ja paloasiat. Tähän tutkimukseen erityisesti liittyviä ovat rakentamistapaohjeen ohjekortit LVI-01 - LVI04, jotka käsittelevät korkean rakentamisen LVI-teknisiä asioita. [7, s. 62–70.]

Maankäyttö- ja rakennuslaissa on säädetty suunnittelutehtävien vaativuusluokista. Vaativuusluokat ovat vähäinen, tavanomainen, vaativa ja poikkeuksellisen vaativa. *Valtioneuvoston asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määräytymisestä* esittää poikkeuksellisen vaativan IV- ja KVV-suunnittelutehtävän kriteerit. [9, 16.§, 20.§.] Vaikka asetusteksteissä ei ole suoraa mainintaa, niin poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän kriteerit täyttyvät korkeassa rakentamisessa käytännössä aina jokaisella suunnittelun osa-alueella. Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeessa mainitaan erikseen, että korkeassa rakentamisessa

suunnittelutehtävät ovat aina poikkeuksellisen vaativia. Kelpoisuuden osoittamiseen voidaan hyödyntää FISE pätevyyttä, mutta se tulee varmentaa hankekohtaisesti aina ennen hankkeen aloittamista. [7, s. 1, 3.] Eli korkeassa rakentamisessa LVI-suunnittelijan on aina täytettävä poikkeuksellisen vaativa -pätevyysluokka.

Kuopion kaupungilla ei ole omaa vastaavanlaista ohjetta kuin Helsingillä, koska korkean rakentamisen hankkeita on huomattavasti vähemmän kuin Etelä-Suomessa. Kuopiossa rakennusvalvonta noudattaa LVI-suunnittelijoiden ja työnjohdon osalta samoja tulkintakortteja kuin Helsinki. Kaupungit myös kuuluvat Topten-yhteistyöhön, jonka tarkoitus on yhdenmukaistaa kelpoisuuden arviointia eri kaupunkien rakennushankkeissa. [10; 11.]

Kuopion kaupungin rakennusvalvonnan LVI-insinöörin Tomi Toivosen mukaan LVI-suunnittelun osalta poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän kriteerit täyttyvät jo 13 kerroksessa, ja poikkeuksellisen vaativan LVI-työnjohtotehtävän osalta raja on 16 kerrosta. Toivosen mukaan suunnittelutehtävän kerrosraja on jokseenkin keinotekoinen, koska esimerkiksi asuntokohtaisilla ilmanvaihtojärjestelmillä toteutettu korkea asuinkerrostalo ei juuri poikkea matalasta, jos samaa ratkaisua toistetaan kerros kerrokselta. Vaativuusluokka on siis tarkastettava kohteessa käytettävän LVI-tekniikan mukaan, eli se voi olla tavanomainen, vaikka rakennus olisi rakennusteknisesti poikkeuksellisen vaativaa luokkaa. Poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän pätevyyden omaavalla suunnittelijalla tulisi lisäksi olla vähintään 6 vuoden kokemus sen tyyppisestä rakentamisesta, johon ollaan ryhtymässä. Suunnittelijoiden riittävästä kokemuksesta on myös suuri etu hankkeeseen ryhtyvälle suunnittelutoimistolle, jotta hanke varmasti onnistuu. [10.]

Korkean rakentamisen kohteissa vaaditaan lähes poikkeuksetta myös kolmannen osapuolen tarkastus. Ulkopuolisen tarkastuksen laajuus vaihtelee hankekohtaisesti, mutta usein se koskee korkean rakentamisen erityispiirteitä. Kolmannen osapuolen LVI-tarkastajalla on myös oltava pätevyys poikkeuksellisen vaativaan suunnittelutehtävään, ja myös kokemusta korkean rakentamisen LVI-suunnittelusta. Suunnitelmien vastuu säilyy ulkopuolisesta tarkastuksesta huolimatta suunnittelijalla. [12; 7, s. 36.]

3 LÄMMITYS- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT

Korkeiden rakennusten lämmitys ja jäähdytys poikkeavat normaalista, ja vaativat usein lisäselvityksiä, enemmän tilaa ja erilaisia teknisiä toteutusratkaisuja. Korkeuden myötä tehontarvelaskelmat vaativat enemmän tarkastelua ja laskentaa ja korkeus tuo haasteita myös järjestelmän paineiden hallintaan. Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen mukaan lisäselvityksiä vaaditaan korkeassa rakentamisessa. [7, s. 64.]

Korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen mukaan lisäselvityksiä vaaditaan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien vyöhykejaosta, verkostoista, ja verkostojen lämpötiloista. Putkimateriaalien, verkostolaitteiden ja lämmönluovuttimien paineenkestoista ja putkistojen lämpölaajenemisesta ja kannakoinnista. Kohteen LVI-toteutuksesta tulee laatia talotekniikkasuunnittelun perusteet -asiakirja, ja kaikki järjestelmien erityisratkaisut tulee esittää siinä. Lisäksi lähes poikkeuksetta vaaditaan simulointiohjelmalla laaditut lämmitystehontarvelaskelmat, joissa on huomioitu tuulen ja vuotoilman vaikutus tehontarpeeseen. Suunnittelijan on myös laadittava lisäselvitykset energiatehokkuuslaskelmista E-lukuineen. Myös tekniikan reikävaraukset tulee suunnitella ja toimittaa elementtisuunnittelun aikataulun mukaisesti. [7, s. 64.]

Useat Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeessa listatut asiat ovat muutenkin tyypillisiä suurten rakennusten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien suunnittelun osa-alueita, mutta esimerkiksi vyöhykejako ja kasvavan staattisen paineen myötä erityisesti huomioitava paineenkesto ovat erityisesti korkealle rakentamiselle ominaisia poikkeuksia.

3.1 Tehontarvelaskenta

Korkean rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien suunnittelussa on kiinnitettävä erityistä huomiota korkeuden vaikutukseen lämmitys- ja jäähdytystehontarvelaskennassa. Tilojen lämmitystehontarpeeseen vaikuttaa pääasiassa rakenteiden eristävyys, tiiveys ja ilmanvaihto, mutta myös ympäristön olosuhteet. Rakennuskorkeuden myötä rakennusta ympäröivä ilmasto muuttuu poikkeavaksi verrattuna matalaan rakennukseen. Ylempänä tuulee enemmän ja ilma on viileämpää, toisaalta myös auringolta varjostavia tekijöitä,

kuten puustoa, maanmuotoja ja muita rakennuksia on vähemmän. Suomen ilmaston lämpötilaskaala kesästä talveen on suuri, ja rakennus tulee toteuttaa energiatehokkaasti [13].

Lämpötilaerojen ja rakennuskorkeuden myötä myös hormivaikutus voimistuu, jolloin rakennus käyttäytyy savupiipun tapaisesti ja ilma kulkee rakennuksen sisässä ylöspäin. Mitä suurempi ero on rakennuksen sisälämpötilan ja vallitsevan ulkolämpötilan välillä, sitä kovempi hormivaikutus on. Hormivaikutus voi kylmällä ilmalla tehdä rakennuksen alaosan alipaineiseksi, jolloin kylmä ulkoilma pääsee ovista ja rakenteiden läpi jäädyttämään alimpien kerrosten tiloja. Tämä vaikuttaa rakennuksen lämmityksen ja jäädytyksen tehontarvelaskelmiin. Rakennuksen yläosan korkeudella vallitseva ilmasto on haastavampi, kun kylmyyden ja tuulen vaikutus lisää lämmitystehontarvetta. Kuitenkin myös rakennuksen alaosassa voi olla hormivaikutuksesta ja sen aiheuttamasta vuotoilmasta johtuen yläkertojakin suurempi lämmitystehontarve. Tuulen ja hormivaikutuksen aikaansaama voimistunut vuotoilmavirta voi vaikuttaa rakennuksen lämmitystehontarpeeseen huomattavan paljon. [12.] Hormivaikutuksesta enemmän kappaleessa 6.1.

Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohje edellyttää laskennallista painesuhdetarkastelua esimerkiksi IDA ICE -sovelluksella tai muulla dynaamiseen laskentaan soveltuvalla ohjelmistolla. [7, s. 68.] Samalla simulointimallilla on mahdollista tarkastella lämmityksen mitoitustehoja. IDA-ICE -simulointi huomioi auringon säteilyn, tuulen, vuotoilmanvaihdon ja lämpötilavaihtelut tehontarvelaskennassa, kun taas samankaltaisessa Riuska-ohjelmassa ei ole niin kattavasti ominaisuuksia esimerkiksi tuulen ja dynaamisten olosuhteiden huomioimiseksi. IDA-ICE-tarkastelut on mahdollista tehdä sekä hormivaikutus huomioiden että ilman hormivaikutusta, jolloin ilmiön vaikutus lämmitystehontarpeeseen voidaan eriyttää [7, s. 68]. Ilman huolellista laskentaa hormivaikutuksen myötä voimistuva vuotoilmavirtaus voi olla suunnitteluvaiheessa vaikea selvittää, jolloin lämmitystehontarve saattaa jäädä alimitoitetuksi [14, s. 24].

LVI-suunnittelija usein lisää tehontarpeeseen varmuuskerrointa, jotta tehontarpeen alimitoitukselta vältytään. Varmuuskerroin voi kuitenkin olla pienempi nykypäivän tarkasti mallinnetussa ja simuloidussa kohteessa kuin

perinteisemmällä tavalla arkkitehdin tasokuvien perusteella lasketussa koh- teessa. Simuloinnin avulla on mahdollista selvittää myös rakenteista riippuvai- nen passiivisen jäähdytyksen vaikutus ja aktiivisen jäähdytyksen tarve. IDA- ICE-simuloinnin myötä rakennukseen voidaan jo suunnitteluvaiheessa valita optimaalisimmat ratkaisut muun muassa ikkunatyypeille, ja jäähdytykseen vai- kuttaville tekijöille. Ikkunat ovat jäähdytyksen kannalta energiatehokas passiiv- vinen ratkaisu [3].

3.2 Paineiden hallinta nestejärjestelmissä

Toisena korkeiden rakennusten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien suunnitte- lussa huomioitavana asiana on verkostopaineiden hallinta. Paineistetussa jär- jestelmässä paine koostuu dynaamisesta sekä staattisesta paineesta. Dynaa- minen paine muodostuu aineen liikkuaessa putken sisällä, ja siihen vaikuttavat tekijät ovat aineen tiheys sekä aineen nopeus. Staattinen paine muodostuu kerrostuneen aineen massasta. Mitä enemmän ainetta on tarkastelupisteen yläpuolella, sitä suurempi on tarkastelupisteen staattinen paine. Nestejärjes- telmissä staattista painetta voidaan kutsua myös hydrostaattiseksi paineeksi. [15, s. 111–115.] Sekä staattinen- että dynaaminen paine vaikuttavat niin läm- mitys- ja käyttövesiputkistojen, kuin ilmanvaihdonkin suunnitteluun.

Rakennuskorkeuden myötä staattinen paine kasvaa, ja siihen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Hydrostaattisen paineen voi laskea kaavalla 1 [15, s. 106].

$$p = \rho gh \quad (1)$$

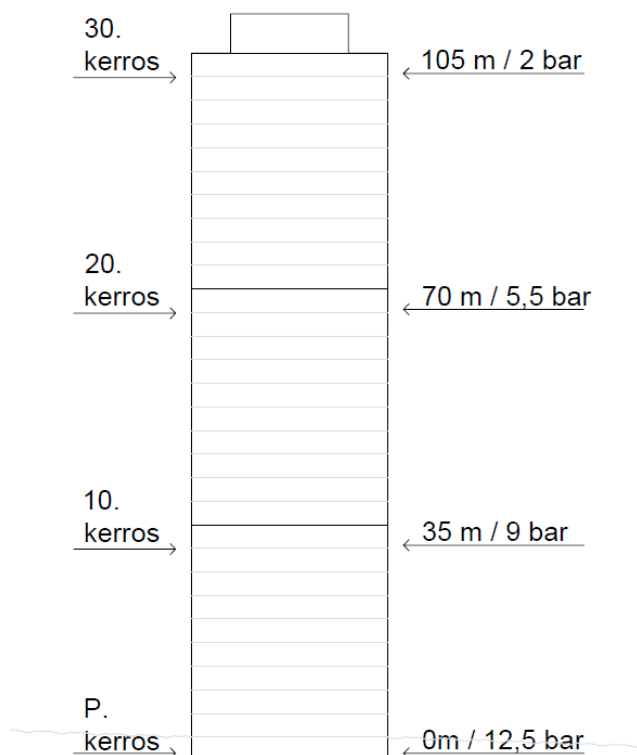
jossa,	p	paine, Pa
	ρ	tiheys, kg/m ³
	g	putoamiskiihtyvyyys, m/s ²
	h	nestepatsaan korkeus, m

LVI-suunnittelijan tulee määrittää rakennuksen jokaiselle lämmitysverkostolle suunnittelupaine, joka tarkoittaa suurinta mahdollista käyttöpainetta. Yli kaksi- kerroksisissa rakennuksissa suunnittelupaineen suositellaan olevan 600 kPa. [16, s. 23.] Rakennuksen korkeuden myötä suunnittelupaine voi kuitenkin olla myös suurempi, jos järjestelmän ominaisuudet niin edellyttävät.

Suunnittelupaineen määrittämiseen vaikuttavat muun muassa verkoston osien rakennepainet ja verkostolta halutut ominaisuudet.

Lämmitysjärjestelmän paine on suhteessa verrannollinen korkeuteen, mutta se ei kuitenkaan ole täysin vakio. Yleisesti verkoston käyttöpaineeseen vaikuttavat muun muassa rakennuskorkeus, nesteen lämpötila, esiasetettu paine paisuntasäiliössä ja nesteen tiheys. [17, s. 5.] Tarkasteltaessa painetta eri verkoston kohdissa paine on suurimmillaan nesteen ollessa lämpimimmillään verkoston alapäässä kiertovesipumpun jälkeen, jolloin myös staattinen paine on suurimmillaan. Paine laskee sen jälkeen kierron edetessä ylöspäin rakennukseen. Paineen laskuun vaikuttavat kitkاپainehäviö, verkoston kertavastukset ja verkoston korkeuserot hydrostaattisen paineen muodossa. Paineeseen vaikuttaa suuresti myös nesteen lämpötila [17, s. 5]. Kun lämmitystehon tarve on korkeimmillaan, myös verkoston paine nousee nesteen lämpötilan noustessa.

Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty 30 kerroksisen rakennuksen staattisen paineen muodostumisen periaatepiirros kerroskorkeuden ollessa lattiapinnasta lattiapintaan 3,5 metriä. Jos ylimmän kerroksen käyttöpaineeksi asetetaan 2 baaria, niin kellarikerroksessa putkilinjan paine nousee jopa 12,5 baariin.



Kuva 1. Esimerkki 30-kerroksisen rakennuksen korkeudesta metreinä ja vesipatsaan staattinen paine baareina, johon on lisätty ylimmän kerroksen 2 baarin käyttöpaine

Putkien, putkiosien ja laitteiden, kuten venttiilien, paineenkesto on ilmoitettu PN-paineenkestoluokissa. Yleisimmin käytetyt paineenkestoluokitukset ovat PN6, PN10 ja PN16, joissa luku kertoo rakennepaineen eli paineenkeston baareissa. Putkimateriaaleja ja liittimiä on saatavilla ainakin PN400-luokkaan asti, jolloin paineenkesto on 400 baaria. [18.] Niin suurta rakennepainetta ei tarvita niinkään talotekniikassa, mutta esimerkiksi teollisuusprosesseissa. Rakennuskorkeuden ylittäessä 50 metrin on suositeltavaa siirtyä tyyppillisestä lämmitysverkoston PN6-paineenkestoluokasta PN10-luokkaan. Korkeammalle rakennettaessa siirrytään tarvittaessa taas seuraavaan paineenkestoluokkaan. [19.] Paineenkestoluokan kasvattamisessa on tyyppillistä, että putken seinämävahvuus kasvaa ja liitokset muuttuvat jyrkemmiksi – esimerkiksi laippaliitoksiin. Paineenkestoluokan kasvattaminen nostaa hankintakustannuksia.

Varoventtiilin ollessa tarkoituksellisesti aina lämmitysjärjestelmän herkin osa paineenkeston näkökulmasta, ovat lämmönluovuttimet ja tietyt verkostolaitteet yleensä toiseksi heikoimpia. Lämmönluovuttimista esimerkiksi suunnittelussa tyyppillisissä Purmo Compact -radiaattoreissa on PN10-rakennepaine ja KON-konvektorissa PN8-rakennepaine [20; 21]. Lattialämmitysjärjestelmillä on usein ollut vain PN6-paineenkestoluokitus, mutta Uponor on lanseerannut erityisesti korkeisiin rakennuksiin tarkoitettua lattialämmitysjärjestelmän, jonka kaikki osat ja lämmönluovutusputkisto on PN10-rakennepaineen omaavia. Rakennepaineen noustessa PN6:sta PN10:een teknisten tilojen etäisyyttä toisistaan on mahdollista kasvattaa jopa 40 %. [22.] Mahdollisuuksien mukaan korkeaan rakennukseen on kustannustehokkainta valita korkean rakennepaineen omaavat lämmönluovuttimet ja laitteet, koska se vähentää teknisten tilojen tarvetta rakennettaessa korkealle. Verkoston yläosassa on kuitenkin mahdollista käyttää pienemmän rakennepaineen omaavia lämmönluovuttimia.

Rakennuskorkeudella ei ole vaikutusta kiertovesipumpun mitoitukseen. Suljetun järjestelmän kiertovesipumppua mitoittaessa staattista nostokorkeutta ei huomioida, vaan ylös menevä neste tulee myös alas. Pumpulta vaadittava nostokorkeus muodostuu ainoastaan verkoston virtausvastuksista, eikä staattinen paine vaikuta siihen. Käytännössä suljetun piirin pumppumitoitus on samanlainen riippumatta siitä, onko lämmitysverkosto suuri korkeus- vai pituus-suunnassa. Kiertovesipumppu on kuitenkin sijoitettava verkostoon huomioiden staattinen paine paineenkeston kannalta. [17, s. 5.]

3.3 Vyöhykejako

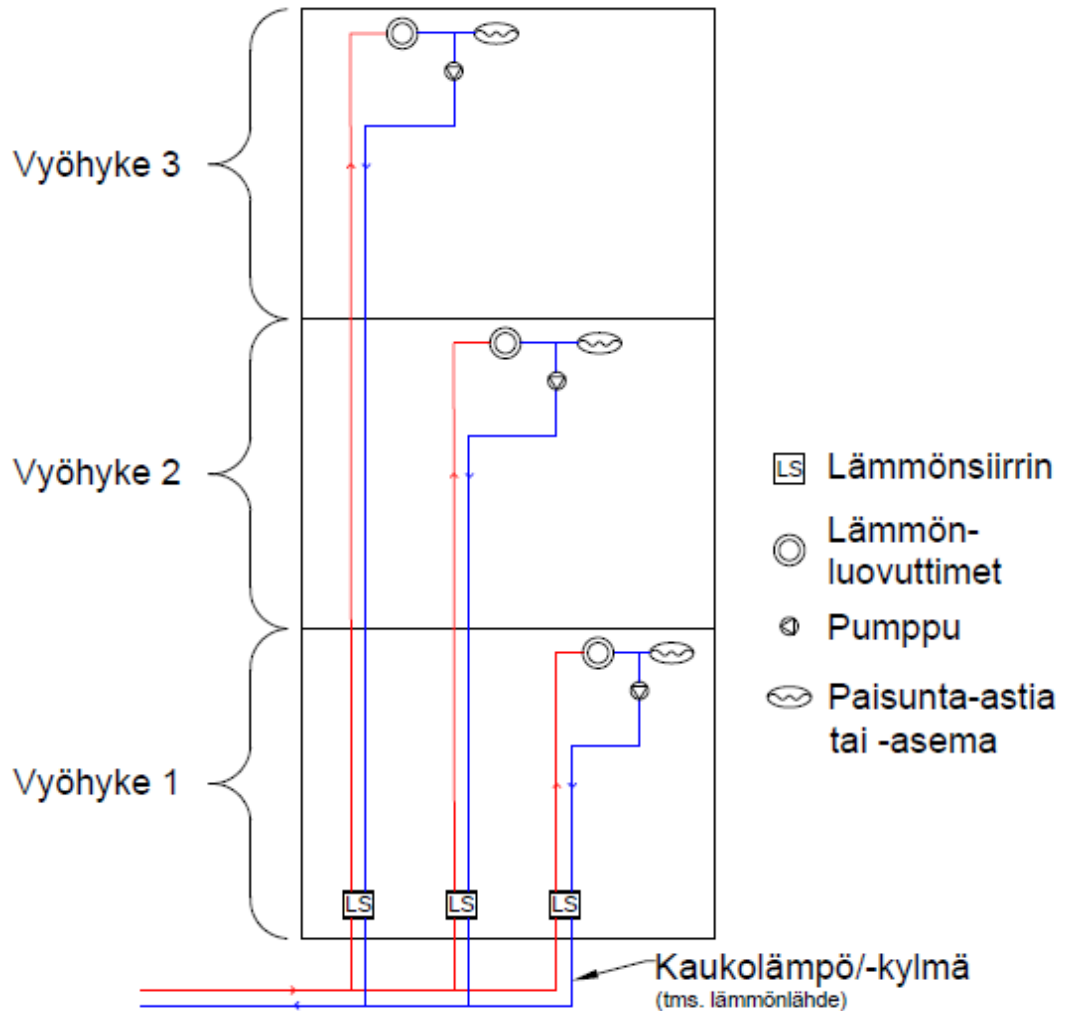
Haasteena korkean rakennuksen lämmitysjärjestelmää suunniteltaessa on paineenkeston huomioivat suunnitteluratkaisut. Koska järjestelmän staattinen paine kasvaa rakennuskorkeuden kasvaessa, on rakennuksen lämmitysjärjestelmää suunniteltaessa huomioitava, ettei se nouse yli järjestelmälle sopivan rajan. Ratkaisuna staattisen paineen hallintaan on jakaa rakennuksen lämmitysjärjestelmä lämmönsiirtimillä useampaan piiriin eli käytännössä nousulinjoihin ja useaan erilliseen pystysuuntaiseen vyöhykkeeseen. Näin yksittäisen toisiopiirin alimman pisteen paine saadaan pidettyä riittävän alhaisena verkostolaitteita varten. Vyöhykejakomenetelmälle ominaista on se, että lämmönsiirtimiä ja joudutaan käyttämään enemmän kuin perinteisissä ratkaisuissa, ja siten myös teknisten tilojen tarve kasvaa jopa moninkertaiseksi. [12.] Tekniset tilat painottuvat rakennuksen alaosaan, koska kaukolämpöjohtoja tulisi sijoittaa mahdollisimman vähän rakennuksen sisään. [16, s.4]. Kaukolämmön tarjoajan kanssa on kuitenkin mahdollista neuvotella siitä, kuinka korkealle ensiöpiirin putket voi tuoda rakennuksessa [12]. Neuvottelun lisäksi kaukolämpöpaketin sijaintiin vaikuttaa myös kaukolämmön käytettävissä oleva paine-ero, jotta säätöventtiilille saadaan riittävä auktoriteetti ja vakaa säätö pitkien putkilinjojen syödessä venttiilin käytettävää painetta.

Korkeassa rakentamisessa hyväksi todettuja vyöhykejakomenetelmiä on käytännössä kolmea erilaista, joista on mahdollista luoda erilaisia variaatioita käyttökohteesta riippuen. Jokaisen menetelmän periaate on kuljettaa lämpöenergia rakennukseen kauttaaltaan niin, että verkosto on paineenkeston huomioiva. [12; 23, s. 4.] Yksinkertaistettuna tornitalon vyöhykejaon periaate on jakaa rakennus useammaksi päällekkäiseksi taloksi. Esimerkiksi 16-kerroksisen talon voi ajatella kahdeksi 8-kerroksiseksi, jolloin yksi järjestelmä palvelee kahdeksanteen kerrokseen asti ja toinen taas yhdeksänneistä ylöspäin [19].

Alla esitetyt vyöhykejakomenetelmät on yksinkertaistettu omiin kuviinsa. Esimerkkirakennukset ovat jaettu kolmeen vyöhykkeeseen, mutta vyöhykkeitä voi olla myös enemmän tai vähemmän. Vyöhykkeet voivat olla jaettu esimerkiksi 10–15 kerroksen osuuksiin. Rakennuksessa voi olla useita lämmitysverkostoja, esimerkiksi ilmanvaihdon ja tilojen lämmitykseen. Siten yksittäisessä rakennuksessa on mahdollista käyttää myös useita eri vyöhykejakomenetelmiä.

3.3.1 Vyöhykekohtaiset pystyrungot

Ensimmäisenä menetelmänä vyöhykejakomenetelmistä on alla olevassa kuvassa 2 esitetty itsenäisillä nousulinjoilla toteutettu vyöhykejakomenetelmä.

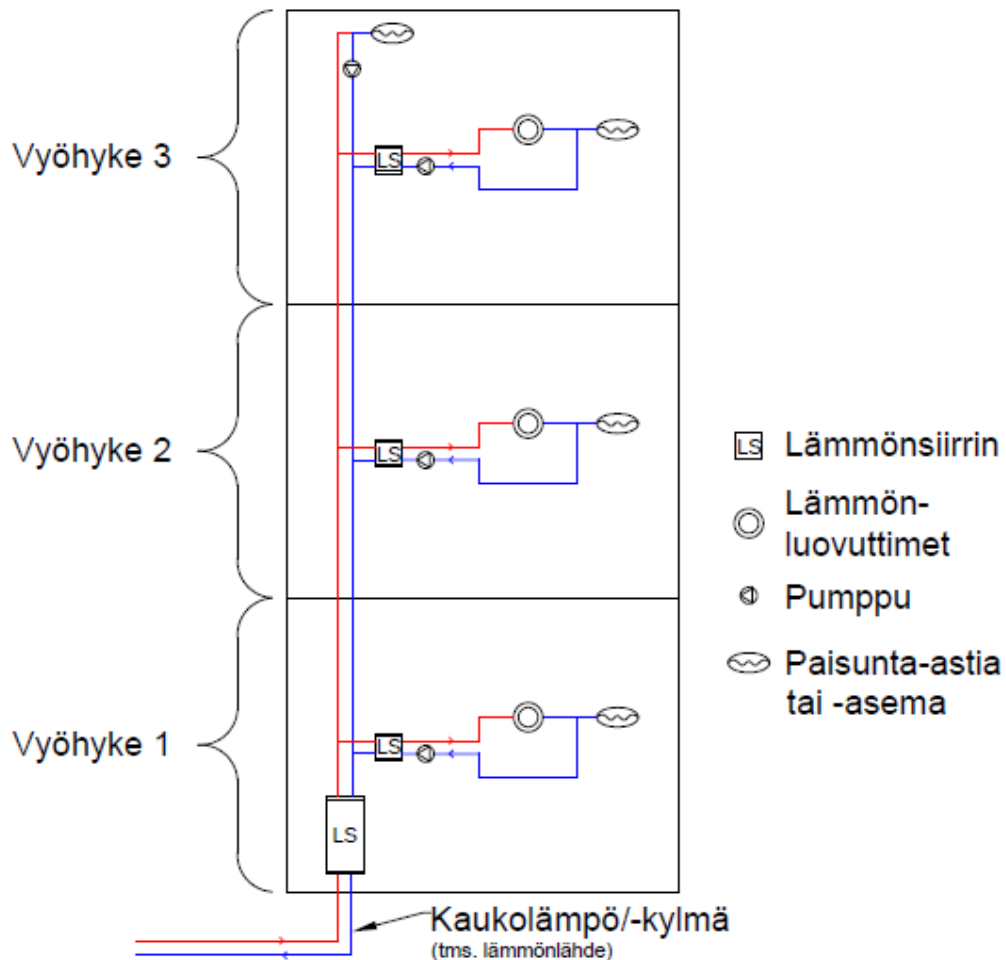


Kuva 2. Vyöhykekohtaisilla pystyrungoilla toteutettu lämmitysjärjestelmä

Menetelmän periaatteena on toteuttaa jokaisen vyöhykkeen lämmitys oman lämmönjakohuoneessa sijaitsevan siirtimensä avulla. Jokaista vyöhykettä palvelee siten myös vyöhykkeen omat pystyrungot, joista korkeimmat on joko toteutettava korkeapaineisina tai vaihtoehtoisesti sijoitettava välilämmönsiirtimiä korkean pystyrungon keskiosaan. Tämän menetelmän toiminta on varmaa, koska vyöhykkeet eivät ole riippuvaisia toisistaan, toisin kuin muissa vaihtoehdoissa. Ongelma- tai vikatilanteessa on siis mahdollista sulkea vyöhyke, ilman että se vaikuttaa muiden vyöhykkeiden lämmitykseen tai jäädytykseen. [12; 23, s. 8–9.]

3.3.2 Korkeapainenousu

Alla olevassa kuvassa 3 on esitettyä yhdellä korkeapainenousulla toteutettu vyöhykejakomenetelmä.

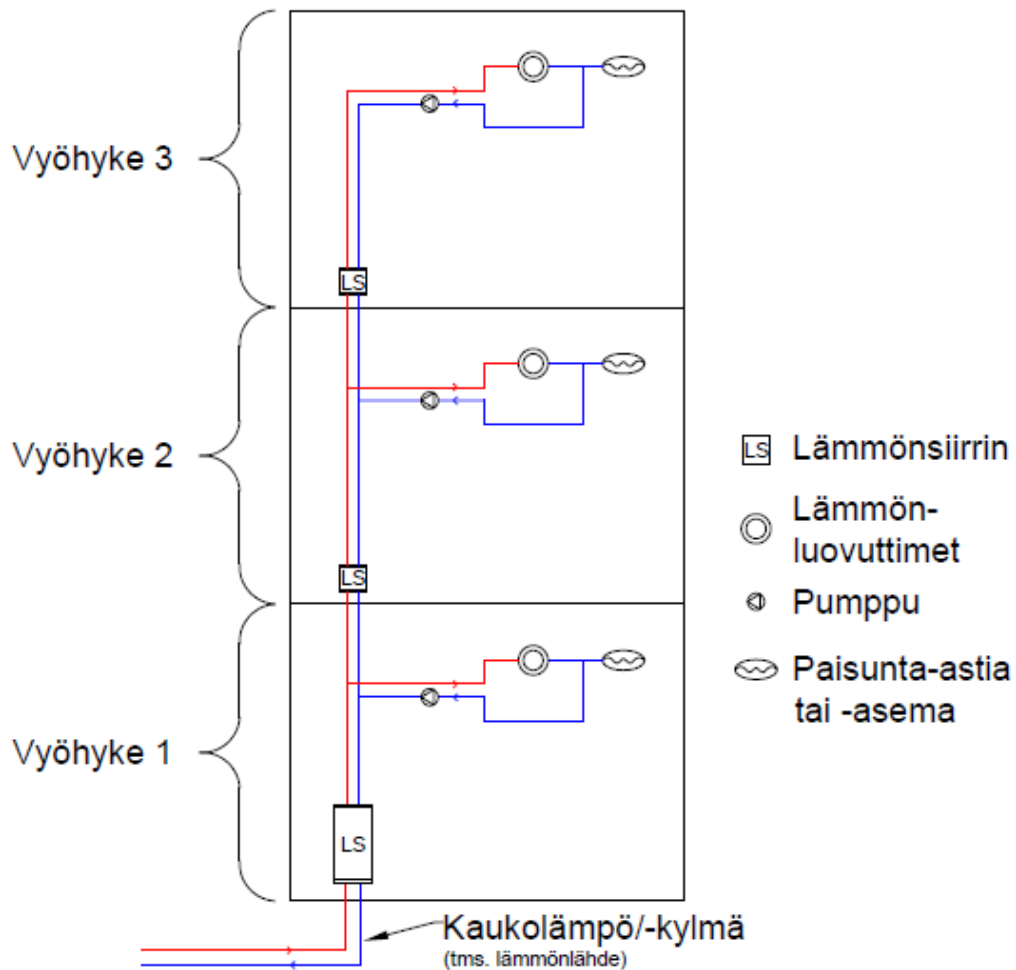


Kuva 3. Yhdellä korkeapainenousujohdolla toteutettu lämmitysjärjestelmä

Vyöhykejaon voi toteuttaa kuvan 3 mukaan yksittäisellä verkostokohtaisella pystynousulla, jolle ominaista on poikkeuksellisen korkea paine, joka määräytyy rakennuksen korkeuden tuoman staattisen paineen mukaan. Korkeapainenousun pääkomponentit ovat rakennuksen alaosassa sijaitseva toisio- ja ensiöpuolen välinen lämmönsiirrin, kiertovesipumppu ja yläosassa sijaitseva paisunta-asema. Komponenteille olennaista on korkea paineenkestokyky, etenkin korkeapainenousun alaosassa. Alin lämmönsiirrin on esitetty kaaviossa suurempana, koska sen kautta johdetaan käytännössä koko kaavion lämmitysteho. Pienempien siirrinten tehon voidaan ajatella olevan kolmasosa isomman siirtimen tehosta, jos lämmönluovutusverkostot olisivat yhtä suuret. Menetelmässä on vaihtoehtoja eniten lämmönsiirtimiä. [12; 23, s. 5–6.]

3.3.3 Vyöhykekohtaiset välilämmönsiirtimet

Kuvassa 4 on esitetty periaatepiirros kolmannen menetelmän toiminnasta vyöhykekohtaisilla välilämmönsiirtimillä.



Kuva 4. Vyöhykekohtaisilla välilämmönsiirtimillä toteutettu lämmitysjärjestelmä

Menetelmän periaate on saman kaltainen kuin aiemmin kuvailtu korkeapainenusu, mutta lämmönsiirtimet ovat pystyrungossa jokaisen vyöhykkeen alaosassa. Lämmönsiirtimet ovat ketjussa niin, että ylempien vyöhykkeiden lämmitys- tai jäähdytysenergia kulkee kaikkien alempien lämmönsiirtimien kautta. Tämän vuoksi alempien siirrinten virtausmäärät voivat kasvaa hyvin suuriksi, ja siten myös putkikoot suurenevat. Useamman välilämmönsiirtimen kytkentä sarjaan kasvattaa järjestelmän alkupään virtaamia ja tuottaa järjestelmään turhaan suuria lämpöhäviöitä. Myös lämmitysverkoston toimintavarmuus heikenee, kun kaikki lämmitysenergia kulkee yksittäisen lämmönsiirtimen läpi. Mahdollisuuksien mukaan kannattaa välttää yli kahden siirtimen kokonaisuuksia, ja toteuttaa pystynousut esimerkiksi korkeapainelinjoin. [12; 23, s. 6–8.]

Jotta jokaisen vyöhykkeen verkostoilla olisi täsmäävät menoveden lämpötilat, on kannattavaa varustaa jokaiselle vyöhykkeelle haarautuvat putket shuntilla, jolloin verkostolämpötilat saadaan säädettyä samanlaisiksi. Kun kaikkien verkostojen suunnitelmat ovat lämpötiloiltaan yhdenmukaisia, on mitoitusvirheen riski pienempi. Vyöhykeverkostojen lämpötilat tulee asetella ylimmän verkoston mukaan, ja pyrkiä käyttämään siirtimiä, joissa on mahdollisimman pieni lämpötilaero. Lämmönluovuttimien ei tarvitse olla niin suuria, kun joka vyöhykkeelle saadaan riittävän kuuma vesi. Ongelmaa ei ole lattialämmitysverkostossa, koska lämpötila shuntataan aina lattialämmitykselle sopivaksi. [17, s. 14].

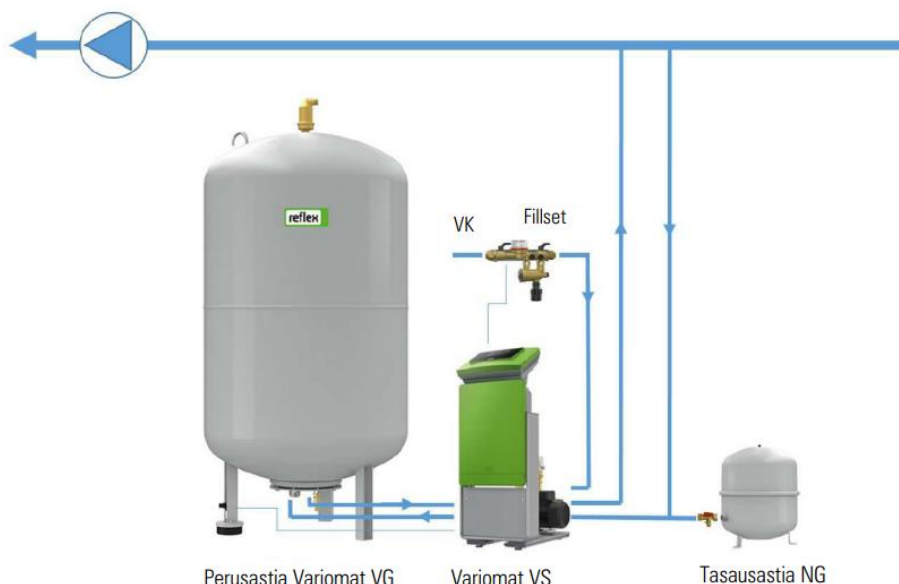
3.4 Paisuntajärjestelmät

Lämmitysjärjestelmissä lämpötilan vaihtelu on suurta, ja sen myötä myös nestetilavuus ja järjestelmän paine muuttuvat paljon. Paisuntalaitteita on avoimia ja suljettuja, ja niiden tehtävä on tasata järjestelmän painevaihtelu. Avoimen paisunta-astian käyttöä ei kuitenkaan suositella käytettäväksi, koska järjestelmän avoimuus aiheuttaa hapen liukenemistä veteen, jolloin vaarana on putkiston ruostuminen sisäpuolelta. Yleisin paisuntaratkaisu on suljettu kalvopaisunta-astia, jossa on kaasu ja sille asetettu esipaine. Verkstopaineen noustessa kalvo antaa periksi ja tasaa painetta. Tätä käytetään yleensä etenkin pienikokoisten rakennusten lämmitysjärjestelmissä. [17, s. 5; 24, s. 1–2.]

Korkeissa rakennuksissa paisuntajärjestelmät vaativat suurempaa kapasiteettia, jolloin tulee tapauskohtaisesti harkita kalvopaisunta-astian sijaan mekaanisten paisuntamenetelmien käyttöä. Näitä ovat esimerkiksi kompressorijä ja pumppukäyttöiset paisunta-astiat. *LVI11-10472 Paisuntajärjestelmien valinta- ja mitoitus*-ohjekortin mukaan yli 50 metriä korkeiden rakennusten suunnittelussa tulisi käyttää kehittyneempiä mekaanisia paisuntajärjestelmiä. Mikäli kalvopaisunta-astiaa kuitenkin käytetään, se on suositeltavaa sijoittaa verkoston yläpäähän. Korkean lämmitysverkoston yläosassa paisunta-astialle riittää pienempi esipaine, koska staattinen paine ei vaikuta paisunta-astiaan sen ollessa verkoston yläpäässä. [16, s. 28; 24, s. 1–2.] Rakennuskorkeuden kasvaessa nesteen vaatima paisuntatilavuus kasvaa, ja kalvopaisunta-astiat vaativat paljon enemmän tilaa teknisistä tiloista kuin mekaaninen paineenpitojärjestelmä [25].

Yleisesti muidenkin verkostolaitteiden, kuten pumppujen, sijainti voi olla myös kannattavampi olla verkoston yläpäässä, jolloin staattisen paineen tuoma ylimääräinen rasitus ei kohdistu niihin [26, s. 68].

Mekaanisilla paisuntajärjestelmillä tarkoitetaan kehittyneempää pumppu- tai kompressoriohjattua suljettua järjestelmää, laitteistoista käytetään usein myös nimeä paineenpitoautomaatti tai -asema. Kuvassa 5 on esitetty Reflex Variomat -paineenpitoasema. Paineenpitolaitteistoja löytyy jopa PN25-rakennepaineisina, joten paineenpitolaitteiston voi sijoittaa hyvin verkoston alaosaan korkeassakin verkostossa. Jo PN16-rakennepaine riittää noin 130 metrin vesipatsaalle. Jos paineenhallintalaitteistot sijoitetaan rakennuksen alaosaan, ylhäällä olevat kalliimmat neliöt voi hyödyntää muuhun kuin teknisille tiloille. Paisuntalaitteiston sijainti on kuitenkin valittava aina tapauskohtaisesti. [25.]



Kuva 5. Reflex Variomat -paineenpitoasema

Paluuputkessa sijaitseva paineenpitojärjestelmä ilmaa verkostoa automaattisesti ja tasaa verkoston painetta. Verkoston paineen noustessa laitteisto päästää nestettä pois, ja paineen laskiessa automaattinen Fillset-täyttöventtiili lisää verkostoon nestettä nostaen painetta. [26.]

Puutteellisella paineenpidolla tai paineenpidon pettäessä riskinä voi olla kiertopumpun kavitaatio ja verkostolaitteiden rikkoontuminen tai jopa vakuumin eli alipaineen muodostuminen lämmitysjärjestelmän yläosaan. Verkostolaitteet kestävät usein painetta hyvin, mutta ovat erityisen herkkiä vakuumille. Alipaineen myötä useat verkostolaitteet voivat rikkoontua, kuten kuvan 6 säiliö.

Myös esimerkiksi venttiilien karat voivat alkaa vuotamaan verkoston sisäisen alipaineen johdosta. [25.]



Kuva 6. Vakuumissa vaurioitunut säiliö

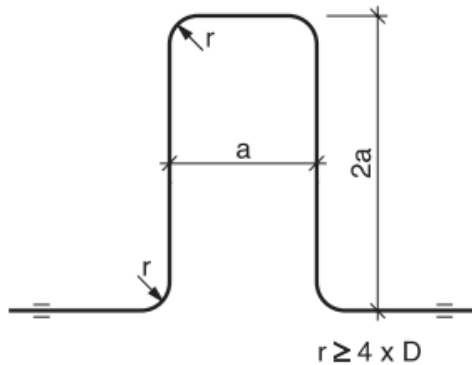
Alipaineen muodostuminen on riski tilanteessa, jossa järjestelmän yläosan paine laskee esimerkiksi putkivuodon tai launneen varoventtiin myötä, ja tämän jälkeen toimintalämpötila putoaa. Lämpötilan laskiessa neste tiheys pienenee, ja järjestelmään yläosaan muodostuu alipainetta. Usein verkostolaitteet kestävät paljon ylipainetta, mutta eivät juurikaan alipainetta. [25.]

3.5 Putkiston lämpölaajeneminen ja kannakointi

Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistaohjeen ohjekortit LVI-01 ja LVI-02 edellyttävät, että vesi- ja viemäri- sekä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien kannakoinnista on tehtävä aina erilliselvitykset korkeaa rakennusta suunniteltaessa [7].

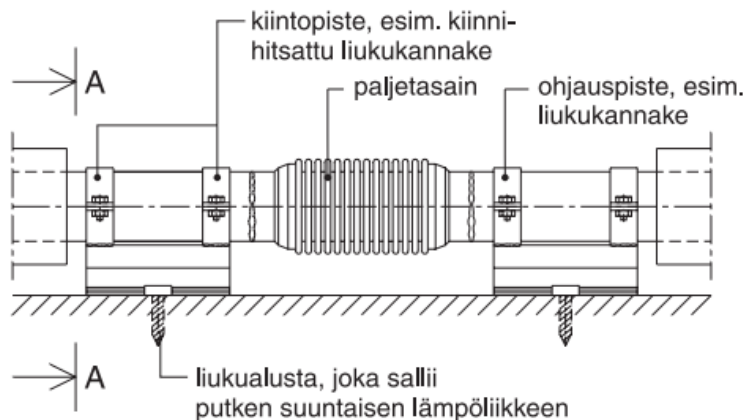
Korkeiden rakennusten suunnittelussa on huomioitava putkistojen lämpöliike. Putkinousut voivat olla korkeita eikä niissä ole sivuttaissiirtymiä, jolloin lämpölaajenemisen merkitys korostuu. Lämpölaajenemiseen vaikuttavat putkiston materiaali, putkiston osuuden pituus ja lämpötilan muutos. Lämpölaajenemisen kompensointi tulee suunnitella ensisijaisesti luonnollisilla sivuttaissiirtymillä. Mutta koska pystykuilut runkoineen pyritään kuitenkin yleensä toteuttamaan mahdollisimman suoraviivaisina, ei sivuttaissiirtymiä tule. Tällöin tulee

käyttää kuvan 7 kaltaisia paisuntalenkkejä, mutta mikäli esimerkiksi tilan ahtauden vuoksi paisuntalenkin teko ei ole mahdollista, tulee lämpölaajenemisen kompensointi toteuttaa paljetasaimin. [12.] Putkiston kannakointi tulee toteuttaa kiinto- ja liukupisteillä sekä linjaan tulee suunnitella paljetasaimia tai lämpöliikkeen vastaan ottavia sivuttaissiirtoja [28, s. 27].



Kuva 7. Paisuntalenkin periaatepiirros

Paisuntalenkki on tahallinen sivuttaissiirtymä pitkässä putkilinjassa, joka ottaa vastaan lämpölaajenemisen. Kuvaan 7 on merkattu lämpöliikettä ohjaavat ohjauspisteet sekä paisuntalenkin mitoittamiseen liittyvät mitat. Paisuntalenkkeihin on kiinnitettävä huomiota suunnitteluvaiheessa, ja niiden tarve tulee kartoittaa. Joskus niiden mitoitus on kuulunut jopa urakoitsijalle. Kuvan 8 paljetasaimen asennusperiaatteesta selviää, että paljetasaimen toisella puolella on kiintopiste ja toisella puolella liikkeen salliva ohjauspiste. [29, s. 1–4].



Kuva 8. Paljetasaimen periaatepiirros

Paljetasaimen käyttö tulee tarpeeseen yleensä silloin, kun paisuntalenkkiä ei voida asentaa esimerkiksi kiuheen ahtauden vuoksi. Paljetasain on poikkeuksellinen lämpötilavaihtelun mukaan elävä osa putkistossa, ja siten voi lisätä verkoston vuotoriskiä. Paljetasain tulee asentaa valmistajan ohjeiden mukaisesti ja kannakointiohjeita noudattaen.

4 KÄYTTÖVESIJÄRJESTELMÄT

Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen LVI-01 ohjekortissa esitetään vaadittavat lisäselvitykset käyttövesijärjestelmien suunnittelussa. Selvitykset tulee laatia vesijohtoverkoston vyöhykejaosta, materiaalien ja laitteiden paineenkestosta sekä paineenkorotuksesta ja kerroskohtaisista painesäädöistä. [7.]

Rakennukseen liitettävän kunnallisen vesijohtoverkoston painetaso on liittymiskohdan sijainnista riippuvainen, ja se ei itsessään aina riitä ylimpien kerrosten vesikalusteille varsinkaan korkeissa rakennuksissa. Tällöin käyttöveden painetta joutuu korottamaan, jotta ylimmille vesikalusteille riittää sopivasti virtaamaa. Samanaikaisesti paine alempien kerrosten vesikalusteilla ei saa nousta liian suureksi. Samaan tapaan kuin lämmitysjärjestelmissä, ratkaisuna tähän on rakennuksen jakaminen useisiin pystyvyöhykkeisiin. [30.] Olennaisena poikkeuksena suunnittelussa on kuitenkin se, että lämmitysjärjestelmät ovat suljettuja verkostoja, kun taas käyttövesijärjestelmä on avoin. Avoimessa järjestelmässä vesi ei kierrä verkostossa vaan poistuu viemärijärjestelmään.

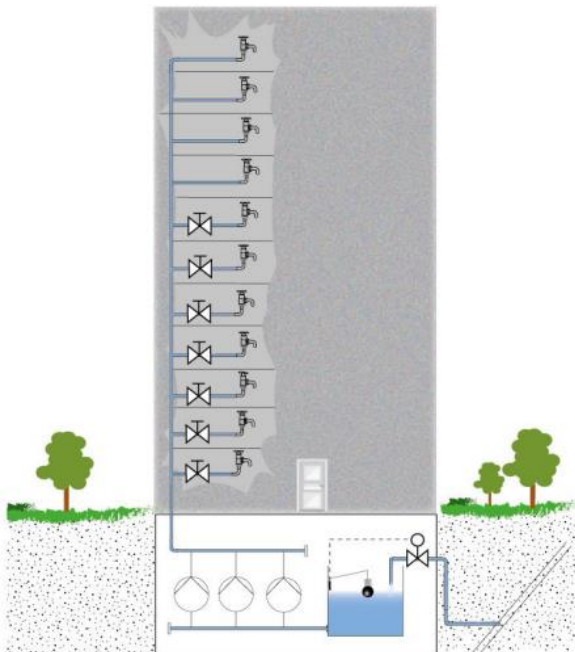
Esimerkiksi Kuopion kaupunkialueella vesijohtoverkoston painetaso on sijainnista riippuen noin 140–200 metriä merenpinnasta. Rakennus on varustettava paineenkorotuksella, jos ylimmät lattiatasot ovat yli 20 metriä ilmoitettua painetasoa alempana. [5, s.13.]

4.1 Paineenkorotus ja -alennus

Jos kunnallisen vesijohtoverkoston painetaso ei ole riittävä rakennuksen ylimpiin kerroksiin, pitää verkostopainetta korottaa paineenkorotuspumpuilla. Paineenkorotusasema sijoitetaan usein rakennuksen alaosaan niin, että se ottaa veden vesimittarin kautta suoraan kunnallisesta vesijohtoverkostosta ja luo korkeamman paineen verkostoon pumpun painepuolelle. [30.] Paineenkorotuspumput varustetaan ulostulopainetta ja pumpun käyntiä säätelevällä automatiikalla. Paineenkorotuslaitteet eivät saa tuottaa häiritsevää ääntä tai painenvaihtelua käyttövesiverkostossa. [31, §19.]

Grundfos Product Center -pumppumitoitussovelluksessa käyttöveden paineenkorotukselle vaihtoehtoina ovat paineenkorotus välisäiliöstä,

kattosäiliöstä tai suoraan verkosta [32]. Kattosäiliöitä Suomessa ei käytetä, ja välisäiliöt ovat myös hyvin harvinaisia. Yleisin käytetty vaihtoehto on paineenkorotus suoraan verkosta. Välisäiliökytkennässä kunnallisen verkoston ja paineenkorotusaseman erottaa säiliö. Välisäiliö tulee tarpeeseen silloin, jos veden saanti on epävarmaa tai vaihtelevaa. Säiliön myötä kunnallisen verkoston painetta ei voi hyödyntää pumpun imupuolella, ja säiliö luo järjestelmään hygieniariskin. [30.] Suomessa kunnallisen verkoston vedenpaine on tasaista, joten kylmän veden puolella säiliö ei yleensä ole tarpeellinen. Paineenkorotuspumppu sijoitetaan siis kylmävesijohtoon vesimittarin jälkeen. Kuvassa 9 on yksinkertaistettu kaavio rakennuksesta, jonka koko käyttövesiverkoston paineentuotto on toteutettu välisäiliöstä imevällä paineenkorotusasemalla.



Kuva 9. Välisäiliöstä imevällä paineenkorotusasemalla toteutettu käyttövesijärjestelmä

Kuvassa rakennuksen alimmat kerrokset on lisäksi varustettu paineenalennusventtiilein, koska korkeapaineisen pystynousun alaosaassa vallitseva paine on liian suuri vesikalusteille [30].

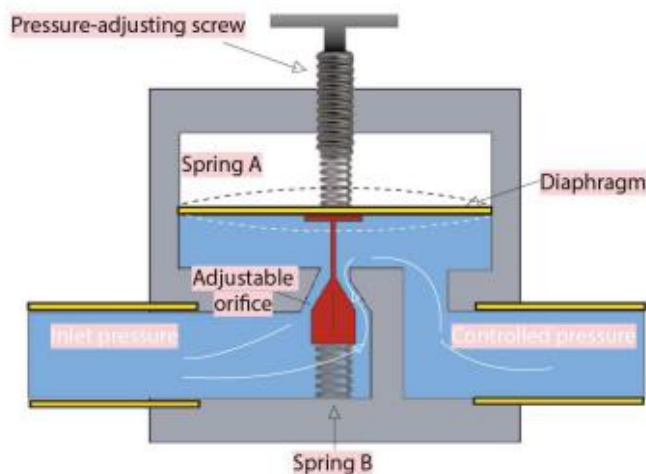
Paineenkorotuspumppuja on järkevää olla rinnan kytkettyinä vähintään kaksi, jotta toiminnan varmuus voidaan varmistaa [33, s. 18]. Esimerkkinä 25-kerroksinen asuinrakennus, jossa on 8 asuntoa per kerros. Rakennuksen 10 alinta kerrosta voidaan kattaa vesijohtoverkoston paineella. Esimerkiksi huoneisto-kohtaisen normivirtaamien summan ollessa kaikelle käyttövedelle 1,6 l/s, paineenkorotuksen normivirtaamien summa olisi 192 l/s. Paineenkorotusaseman

vaadittu mitoitusvirtaama olisi tällöin noin 5,5 l/s. Paineenkorotuspumpun mitoituksessa paineenkorotustarpeen määrittää vaikein vesipiste eli käytännössä korkeassa rakennuksessa ylin vesipiste, jota paineenkorotuspumpulla varustettu käyttövesiverkosto palvelee. Esimerkkirakennuksen paineenkorotuspumpuksi kävisi siis esimerkiksi kuvan 10 neljällä pumpulla varustettu paineenkorotusasema.



Kuva 10. Grundfos HydroMPC-E-paineenkorotusasema

Kuvan PN16-rakennepaineisen Grundfos Hydro MPC-E-paineenkorotusaseman maksimivirtaama on 8,6 litraa sekunnissa ja suurin nostokorkeus 161 metriä [34]. Kun verkoston painetta korotetaan, niin on riskinä, että verkoston alimmilla vesipisteillä on liian suuri paine. Tällöin niitä palvelevat jakojohdot on varustettava paineenalennus- eli vakio-paineventtiilein [30]. Mikäli painetarkastelussa jakojohdon paine ylittää 500 kPa, tulee se varustaa paineenalennusventtiilillä [31, §19]. Vesikalusteille tyypillisesti riittää 100–300 kPa painetaso. Kuvassa 11 on esitetty paineenalennusventtiilin leikkauskuva, josta selviää sen toimintaperiaate.



Kuva 11. Paineenalennusventtiilin leikkauskuva

Paineenalennusventtiilin käytössä on kuitenkin riskinä meluhaitat, joten ne kannattaa sijoittaa kauemmas oleskeluvyöhykkeistä. Esimerkiksi yleisesti käytetty Oraksen 4330 paineenalennusventtiili vaatii venttiilirungon puhdistusta 1–2 kertaa vuodessa [35]. Paineenalennusventtiilin käyttö voi siis kasvattaa huoltokuluja huomattavasti, ja niiden laajempaa käyttöä tulee harkita tapauskohtaisesti. Paineenalennusventtiilejä voi sijoittaa joko asuntokohtaisesti vesimittarin yhteyteen tai suuremmalle kokonaisuudelle jakojohdossa [36].

4.2 Vyöhykejako

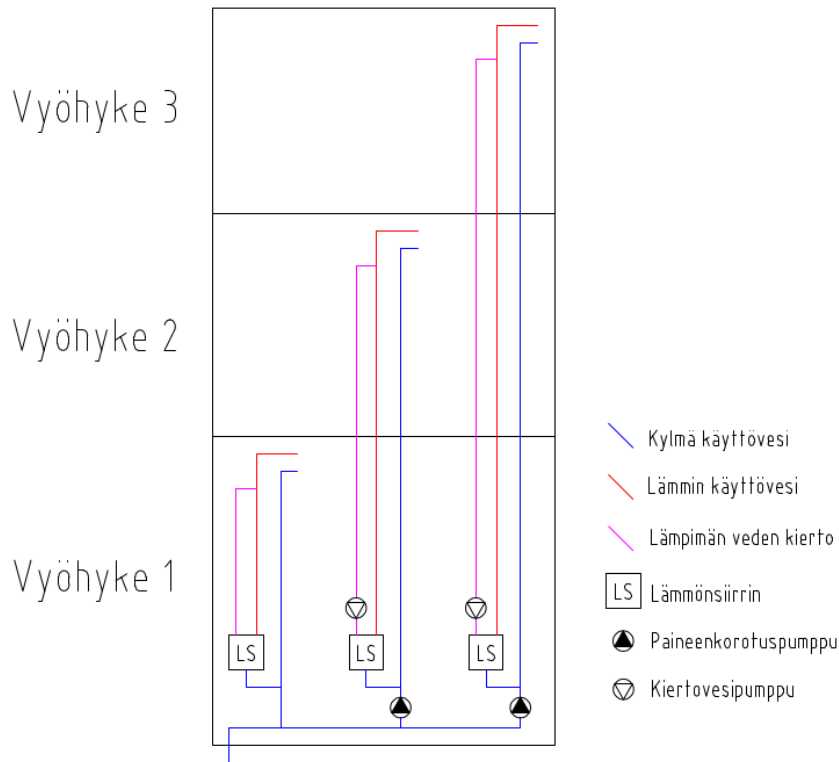
Jotta painetasot pysyvät sallituissa rajoissa ja järjestelmä energiatehokkaana, kannattaa myös käyttövesijärjestelmä jakaa vyöhykkeisiin. Optimaalisimmassa tilanteessa alin vyöhyke määritetään kunnallisen verkoston painetason mukaan, ja sitä ei varusteta paineenkorotuksella. Sitä ylemmät vyöhykkeet toteutetaan erillisillä käyttövesilinjoilla, joiden painetta on korotettu paineenkorotusasemalla. [37.] Paineenkorotus on mahdollista toteuttaa siten, että jokaisen vyöhykkeen paineenkorotukset ovat verkoston alaosassa tai vaihtoehtoisesti kerroksiin sijoitetuilla paineenkorotusasemilla. [12, 23, s. 14–15].

Vyöhykkeen korkeus vaikuttaa energiatehokkuuteen ja kustannuksiin, koska korkea vyöhyke vaatii paljon paineenkorotusta, mutta toisaalta se voi vaatia myös paineenalennusta. Kuten aiemmin mainittiin, jakojohdossa ei tarvitse varustaa paineenalennusventtiilillä, jos verkoston paine on alle 5 baaria ja vesikaluste vaatii noin 2 baarin paineen toimiakseen. Kuvitteellisen rakennuksen kahdeksan kerroksinen vyöhyke on noin 28 metriä korkea, jolloin vyöhykkeen alaosan hydrostaattiseksi paineeksi muodostuu 2,8 baaria. Paineenkorotusta tarvitaan siis noin 4,8 baarin verran. Tässä tapauksessa 8-kerroksisen vyöhykkeen jokaisessa kerroksessa on riittävä vedenpaine, eikä vyöhykkeen alimmankaan kerroksen jakojohdon painetta tarvitse alentaa.

Noin 6–9-kerroksisissa vyöhykkeissä paineenalennusta ei siis välttämättä tarvita, kerrosraja elää kohteen ja verkoston ominaisuuksien mukaan. Kuitenkin on järkevämpää toteuttaa esimerkiksi 10-kerroksisen vyöhykkeen alemmat kerrokset paineenalennuksilla varustettuna kuin toteuttaa useaa matalampaa vyöhykettä. Vyöhykkeiden korkeus on tarkasteltava tapauskohtaisesti.

4.2.1 Vyöhykkeittäin jaettu paineenkorotus

Käyttövesijärjestelmän voi toteuttaa vyöhykkeittäin niin, että rakennuksen alaosasta lähtee omat pystyrunkonsa jokaiselle vyöhykkeelle [12; 23, s. 15]. Alla olevassa kuvassa 12 on havainnollistettu vyöhykejako, jossa kaikki tekniikka painottuu alakerran lämmönjakohuoneeseen.



Kuva 12. Vyöhykkeittäin jaettu paineenkorotus

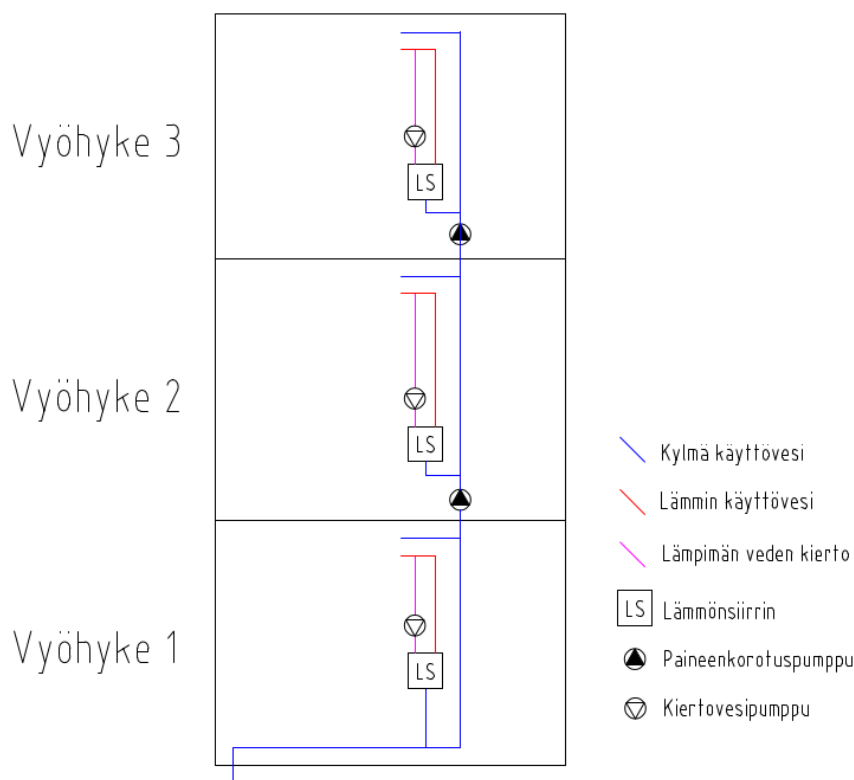
Tässä menetelmässä pystyrunkoja on käytännössä yhtä monta kuin rakennuksen vyöhykkeitäkin, joten putkistot vievät paljon tilaa alemmista pystykui- luista, mutta kerroksista ei viedä kalliita neliöitä paineenkorotusasemille [23, s. 15; 30]. Tekniikan sijoittelu alas hyödyntää myös laitteistojen huoltotoimenpi- teissä ja äänihaittojen syntyminen on epätodennäköisempää. Lämpimän käyt- töveden lämmönsiirtimet voi sijoittaa myös kerroksiin, jolloin niille riittää pie- nempi paineenkesto, mutta siirtimille pitää tuoda lämmitysputket [38].

Käyttövesiverkoston toisiopuolen on aina kestettävä vähintään 10 baarin paine, mutta lämmönsiirtimen toisiopuolen käyttöpaine ei saisi kuitenkaan ylit- tää 10 baaria [31, §7]. Joissain tilanteissa laitteiston paineentarve on vielä si- täkin suurempi, varsinkin jos käytetään menetelmää, jossa ainut

paineenkorotusasema on verkoston alapäässä. Tällaisessa tilanteessa tätä menetelmää ei voi käyttää ilman kaukolämpöyhtiön erillistä lupaa korottaa käyttöpainetta ja käyttää suuremman paineenkeston omaavia verkoston osia. Kerroskorkeudesta riippuen jo noin 25-kerroksisen rakennuksen korkeus on 90 metriä, joka vastaa 9 baarin hydrostaattista painetta vesipatsaan alaosassa. Kun tähän lisätään vesikalusteen vaatima paine, niin jo hydrostaattinen paine ja vesikalusteen vaatima paine yhteensä saavuttavat edellä mainitun 10 baarin rajan. [12; 23, s.16.]

4.2.2 Paineenkorotus kerroksissa

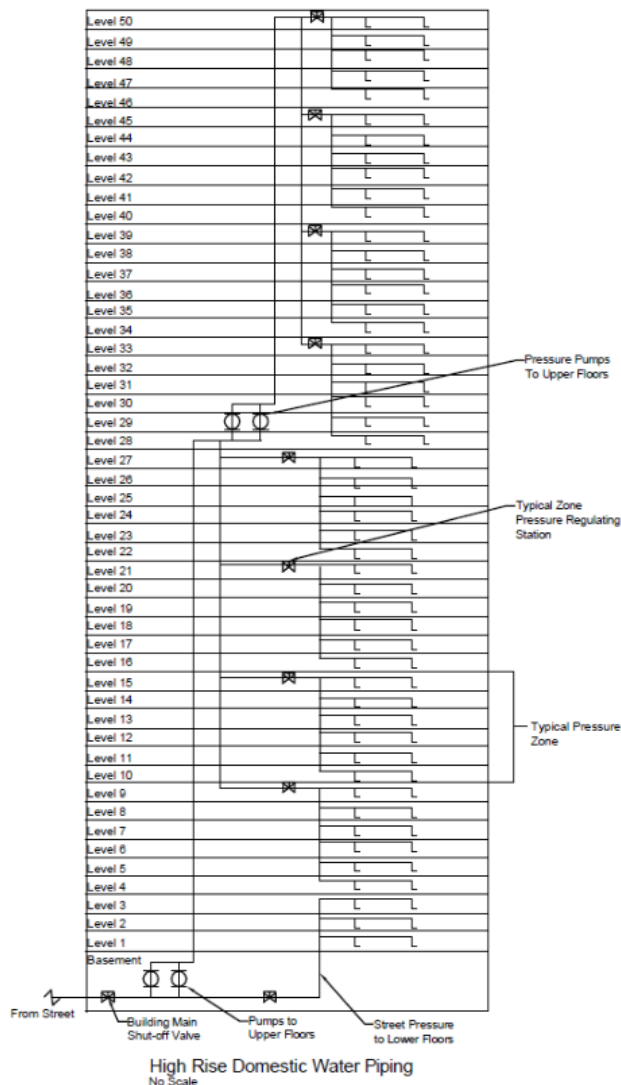
Toisena vaihtoehtona on sijoittaa sekä paineenkorotusasemat että lämmönsiirtimet vyöhykkeittäin kerroksiin. Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva menetelmästä.



Kuva 13. Vyöhykekohtainen paineenkorotus kerroksissa

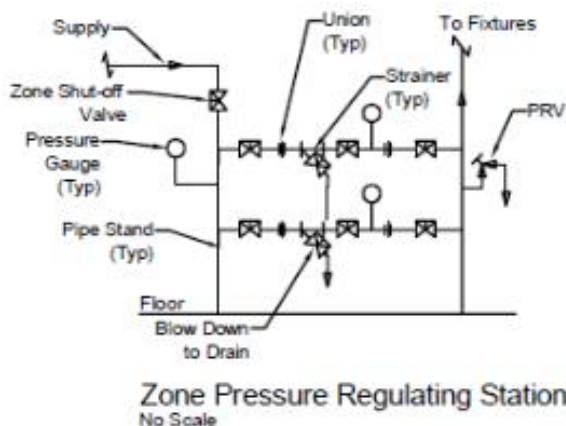
Vyöhykejakomenetelmän etuina on matalammat ja helpommin hallittavat painetasot, jolloin myös vaurioiden riskit ovat pienemmät. Menetelmä kuitenkin vie tilaa ylemmistä kerroksista, joissa neliöhinnat ovat usein huomattavasti kalliimpia ja äänihaittojen riski kasvaa. [12; 23, s. 16.]

Menetelmä on mahdollista toteuttaa myös siten, että kylmävesijohdon paine korotetaan seuraavalle paineenkorotuspumpulle asti, ja yksittäinen jakojohdo haaroitetaan ylhäältä alaspäin varustettuna vyöhykekohtaisilla paineenalennusventtiileillä. Tällöin ylimmät vyöhykkeet eivät välttämättä tarvitse paineenalennusta. Alla olevassa kuvassa 14 on periaatepiirros tästä, jossa vyöhykkeet on jaettu kuuden kerroksen välein. Paineenalennus on vyöhykekohtainen ja vaatii vähemmän huoltotoimenpiteitä. [36.]



Kuva 14. Vyöhykekohtainen paineenkorotus kerroksissa alaspäin palvelevilla jakojohdoilla

Esimerkkikuvan tapauksessa paineenkorotuspumpulta nousevan linjan paine kasvaa jopa 15 baariin, ja alaspäin tuleva vyöhykkeitä palveleva jakojohdotkin ylittää 10 baarin paineen. Suomessa toteutettuna järjestelmä voisi neljän vyöhykkeen sijaan palvella esimerkiksi kolmea, jolloin käyttöpaine pysyisi sallituissa rajoissa. Kuvassa 15 on esitetty edellä mainitun kuvan kerroskohtainen paineenalennusasema.



Kuva 15. Paineenalennusasema

Kerroskohtainen paineenalennusasema on suurempi kokonaisuus kuin vesimittarille sijoitettavat erilliset paineenalennusventtiilit, mutta tämän myötä huoltokohteiden määrä vähenee ja paineenalennusventtiilin meluhaitta pienenee.

4.3 Eristys

Käyttövesiputkistojen eristysmitoitukset tulee toteuttaa LVI-ohjekorttien perusteella ja eristesarjajärjestelmällä. Toisinaan tilaajalla tai suunnittelijalla voi olla käytössä omia ohjeistuksia eristykseen, mutta tärkeintä on, että putkistoeristykset toteutetaan vähintään ohjekorttien mukaisilla eristevahvuuksilla. [39.]

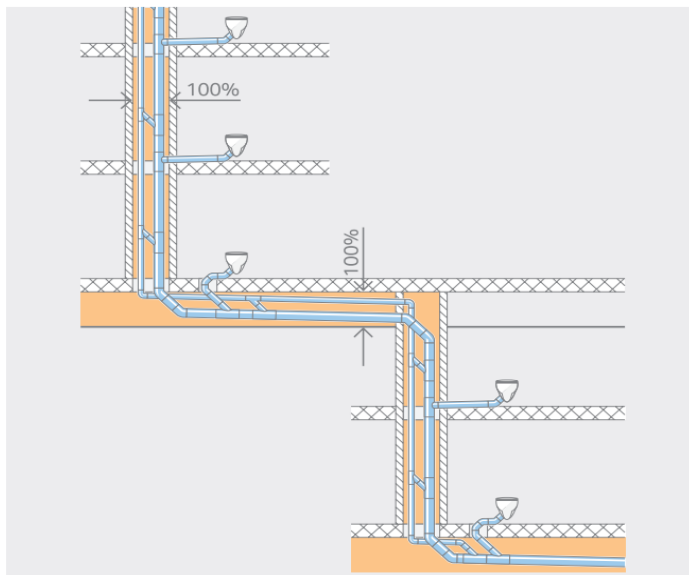
Haasteita pohtiessa nousi esiin kysymys kylmän veden viileänä pysymisestä pitkässä kylmän käyttöveden runkojohdossa. Käyttöveden lämpötila saa olla korkeintaan 20°C, tai mikäli vettä ei käytetä vähintään kahdeksaan tuntiin, saa lämpötila olla korkeintaan 24°C. [31, §6] Korkeassa rakennuksessa käyttöveden runkoputkien koot ovat usein suuria. Suurella putkikoolla on kuitenkin ainoastaan positiivinen vaikutus veden kylmänä pysymiseen, koska suuremman vesimassan jäähtymiseen menee enemmän aikaa. Jos huomattavaa lämpenemistä pääsee tapahtumaan, on kyseessä yleensä puutteellinen eristys. [39.]

Esimerkiksi jos +12°C vesi seisoo eristesarjalla 22 eristetyssä DN65 putkessa ja sisäilman lämpötila on 25°C, kestää vedellä 52,5 tuntia lämmitä vaatimuksen 24°C:seen. Jos samassa tilanteessa on DN32 putki, kestää 20,2 tuntia lämmitä vaatimuksen 24°C:seen. [40.] Laskelmien perusteella voidaan todeta, että kylmävesijohdon lämpeneminen ei poikkea normaalista tilanteesta.

5 VIEMÄRIJÄRJESTELMÄT

Korkean rakennuksen viemärijärjestelmän suunnittelussa tulee noudattaa samoja määräyksiä ja mitoitusohjeita kuin normaalissakin rakentamisessa, mutta rakennuksen korkeus tuo viemärijärjestelmien suunnitteluun lisää huomioitava asioita. Virtaamat viemärissä voivat kasvaa suuriksi, koska rakennuskorkeuden myötä viemäriin rasitus kasvaa. Suuremman rasituksen myötä voidaan joutua käyttämään normaalia suurempia viemäriputkia ja poikkeavia tuuletusratkaisuja. Kerrostalon viemärointi tulee pyrkiä toteuttamaan viettoviemärillä, ettei erillistä pumppausta tarvita. Viettoviemärijärjestelmien suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota virtauksiin, äänitekniisiin asioihin ja viemärihormien tilavarauksiin. [7; 12.]

Tavanomaisesti Suomen matalassa rakennuskannassa käytetään rakennusten sisäiseen jätevesiviemärointiin vain yksiputkijärjestelmää [12]. Toisena vaihtoehtona on käyttää kuvan 16 kaltaista rinnakkaistuuletusta, eli pystykoojaviemärin vieressä on toinen pystyviemäri ainoastaan tuuletusta varten. Rinnakkaistuuletettu järjestelmä lisää viemärointikapasiteettia, mutta vie myös tavallista enemmän tilaa. [41, s. 5.]



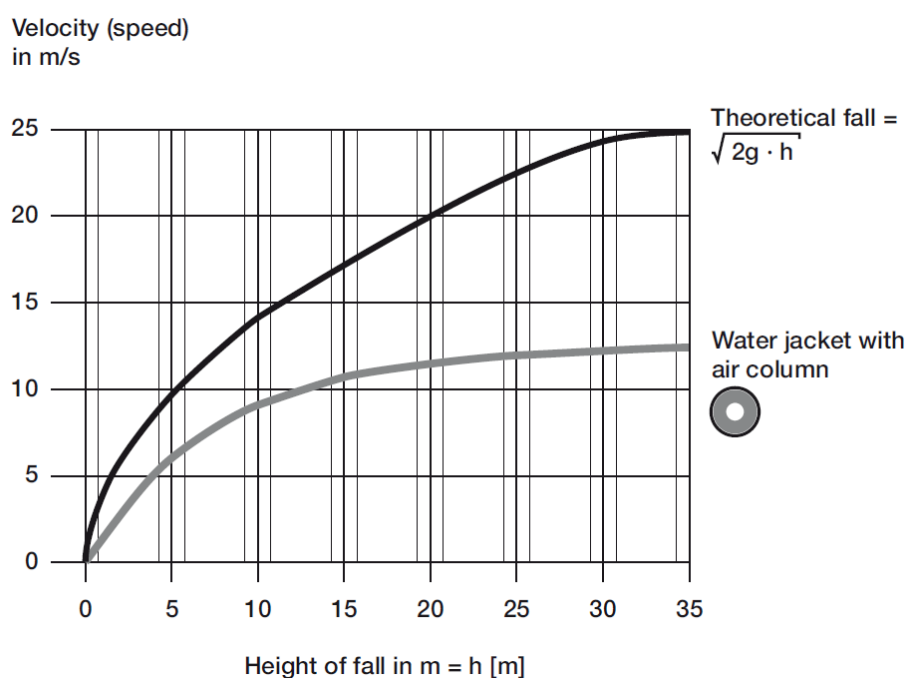
Kuva 16. Rinnakkaistuuletettu viemärijärjestelmä

Tilajakonsernin kokemus on, että kokonaan rinnakkaistuuletettu järjestelmä on Suomessa harvinainen jopa korkean rakentamisen kohteissa. Sen sijaan pystyviemärin alaosan tuuletukseen ja paineenvapautukseen on kiinnitetty enemmän huomiota. [12.]

5.1 Pystyviemäri

Korkean rakennuksen pystyviemärin suunnittelussa huoleksi voi nousta liiallinen syöksynopeus ja viemärin pohjakulman kesto. Pystyviemärissä virratessaan vesi pyrkii tarttumaan viemärin seinämiin, jolloin pyöreän putken keski-osaan jää viemäriä tuulettava ilmapatsas. Viemäröinnin suunnittelussa on kiinnitettävä erityistä huomiota viemärin katkeamattomaan tuuletukseen. Vaaka-putken yläosan tulee säilyä tyhjänä ilman virtausta varten, ja pystyputkessa ilmapatsas on virtauksen keskellä. [12; 4, s. 6–7.] Jatkuva tuuletus tasaa viemärin sisäistä paineenvaihtelua [31, §2].

Syöksyssä virtaavan nesteen nopeus kasvaa $9,81 \text{ m/s}^2$ kiihtyvyydellä, eli normaaliputoamiskiihtyvyydellä. Dawsonin ja Kalinsken [43] tutkimuksen mukaan viemäriputken seinämien aiheuttama kitkavoima kasvaa nopeasti yhtä vahvaksi kuin putoamista kiihdyttävä painovoima. Pystyputken halkaisija ja virtaavan aineen määrä vaikuttavat putoamisnopeuteen vain hyvin vähän, ja noin 3–6 metrin syöksyn jälkeen putoamisnopeus ei enää kasva [43, s.11]. Geberitin vastaavan tutkimuksen ja kuvan 17 mukaan putoamisnopeus lakkaa kiihtymästä noin 13 metrin korkeudella. Jo näin lyhyen pudotuksen myötä saavutetaan siis terminen nopeus- eli rajanopeus, jolloin putoamiskiihtyvyys on lähellä nolaa. [42, s. 7.]



Kuva 17. Nopeus putoamiskorkeuden funktiona vapaapudotukselle ja pystyviemäriissä

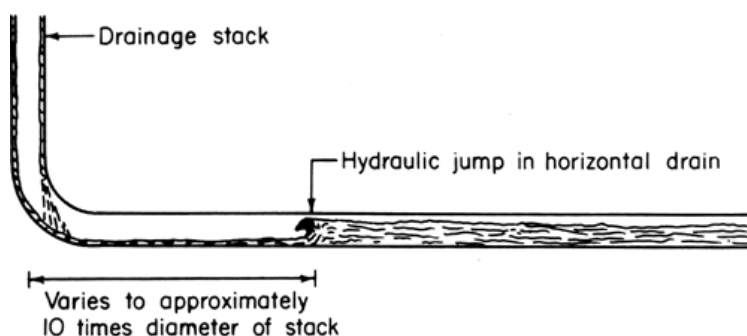
Pystykokoojaviemärin syöksynopeus ei siis aiheuta riskiä rakenteen kestävyys-
teen, kun viemäri on oikein kannakoitu. Pohjakulma on kuitenkin osa, josta voi
aiheutua voimakasta ja häiritsevää ääntä. Tämän vuoksi pystykokoojaviemäri
kannattaa varustaa ääntä vaimentavalla pohjakulmalla. Pohjakulman ääne-
neristys voidaan toteuttaa työmaalla erikseen betonista valamalla tai esimer-
kiksi kuvassa 18 esitetyllä esivalmisteisella pohjakulmaosalla. [44.]



Kuva 18. Lining- esivalmistettu pohjakulma

Esivalmistettua pohjakulmaa voidaan käyttää, jos pystykokoojaviemärin pohja-
kulma sijaitsee välipohjassa. Jos pohjakulma on alapohjassa, tulee se toteut-
taa mahdollisuuksien mukaan loivilla kulmakappaleilla.

Kuormitetun pystyviemärin alaosassa on riskinä hydraulisen hypyn muodostu-
minen. Ilmiö on havainnollistettu kuvassa 19. Hydraulinen hyppy syntyy, kun
virtaussuunta muuttuu pystyviemäristä vaakaviemäriin. Pystyviemäristä tuleva
virtaama hidastuu nopeasti, ja vesi hyppää hetkellisesti tukkien koko putken.
Viettoviemärin toiminnalle ominainen jatkuva ilman virtaus loppuu hetkellisesti,
ja siten viemäriin voi aiheutua alipainetta. [45.] Alipaine voi aiheuttaa hajuluk-
kojen tyhjentymistä ja sen myötä hajuhaittoja rakennuksen tiloihin.



Kuva 19. Hydraulinen hyppy

Hydraulista hyppyä on käytännössä mahdollista pienentää suurentamalla vaa-
kaputken kokoa, tai loiventamalla pohjakulmaa [45].

5.2 Virtauksen optimointi viemärijärjestelmässä

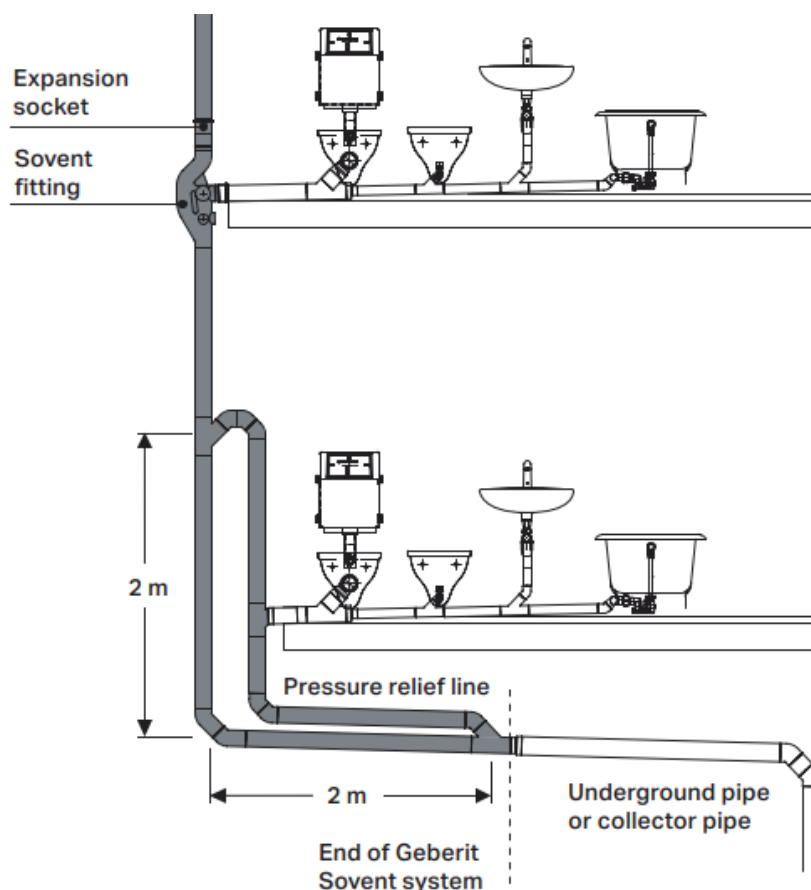
Rinnakkaistuuletettu järjestelmä vie lähes kaksinkertaisesti normaalia enemmän tilaa, mutta rinnakkaistuuletusta korvaamaan on kehitetty hydraulisesti optimoituja viemäröintijärjestelmiä. Yli 5-kerroksisiin rakennuksiin kehitetty Geberit Supertube koostuu kolmesta erilaisesta hitsattavasta pystyviemäriin osasta, jotka ohjaavat veden virtausta siten, että viemäriputken keskellä oleva ilmapatsas säilyy. Kuvassa 20 vasemmalla on Sovent-liitin, joka korvaa tavanomaisen osan, jolla vaakaputki liittyy pystykokoojaviemäriin. Keskimmäinen osa on BottomTurn-pohjakulma, joka ohjaa viemäriin virtausta suunnanmuutoksessa, muuttaen pyörivän virtauksen kerrostetuksi virtaukseksi. Oikealla kuvatulla BackFlip-osalla virtaussuunta muuttuu vaakaviemäristä pystyviemäriksi siten, että pystyviemäriin muodostuu oikeanlainen pyörrevirtaus. [41.]



Kuva 20. Geberit Supertube -järjestelmän osat

Valmistajan ohjeiden mukaan tavanomaisen rinnakkaistuuletetun viemäriin viemäröintikapasiteetti on 12,4 l/s, kun käytetään 160 mm viemäriputkea ja 90 mm tuuletusputkea. Supertube-järjestelmällä 12 l/s viemäröintikapasiteetti saavutetaan 110 mm viemäriputkella ilman rinnakkaistuuletusta. [42, s. 8.]

Riippumatta siitä, toteutetaanko viemäri virtausoptimoidulla viemärijärjestelmällä vai ei, korkean rakennuksen jokaisen pystykokoojaviemäriin alaosa kannattaa varustaa erillisellä paineenvapautusputkella. Kaavio paineenvapautusviemäristä on esitetty kuvassa 21. Pystyviemäriin alaosan tuuletus on tärkeä osa toimivaa viemäriin tuuletusjärjestelmää. [12.]



Kuva 21. Pystyviemärin paineenvapautuslinja

Suuri hetkellinen viemärin kuormitus tai aiemmin mainittu pystyviemärin alaosaan muodostuva hydraulinen hyppy voi täyttää putken hetkellisesti vedellä katkaisten jatkuvan tuuletuksen, jolloin riittävillä etäisyyksillä varustettu paineenvapautuslinja säilyttää ilmayhteyden pysty- ja vaakaputkien välillä. Virtaus voi työntää ilmaa alas pystyviemärissä ilmapatsaasta huolimatta, joka voi muodostaa vaakaputkeen ylipainetta. Viemärin alaosan paineenvapautuslinja tasoittaa tätä ylipainetta pysty- ja vaakaviemäreiden välillä. [12.]

6 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄT

Ilmanvaihtojärjestelmän tavoitteena on luoda rakennuksen oleskeluvyöhykkeelle terveellinen ja turvallinen sisäilmasto kaikissa normaaleissa sääolosuhteissa [46, s. 8]. Ilmanvaihtosuunnittelussa tulee noudattaa yleisiä ohjearvoja ja suunnitteluohjeita kuten normaalistikin, mutta rakennuksen sisäilmastolle voidaan asettaa myös yleisiä ohjearvoja suuremmat vaatimukset. Korkean rakennuksen ilmanvaihdossa on huomioitava enemmän poikkeavia asioita toiminnan varmistamiseksi, nämä asiat johtuvat pääasiassa rakennuskorkeuden myötä muuttuvista olosuhteista. [12.]

6.1 Kerrostalon ilmanvaihtoratkaisut

Kerrostaloissa yleisesti käytetyt ilmanvaihtomenetelmät voidaan jakaa keskitettyihin ja hajautettuihin ilmanvaihtojärjestelmiin. Käyttötarkoituksesta riippuen rakennuksen eri osissa voidaan käyttää eri menetelmiä. Hajautettu ilmanvaihto on tyypillinen uusissa asuinrakennuksissa, kun taas keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää on mahdollista käyttää myös esimerkiksi kerroskohtaisesti toimisto- tai liiketiloissa, joihin hajautettu ilmanvaihto ei välttämättä ole ideaali ratkaisu.

6.1.1 Keskitetty ja kerroskohtainen ilmanvaihto

Perinteinen keskitetty koko rakennuksen ilmanvaihto sopii pieneen kerrostaloon, mutta käytettäessä sitä korkeammissa rakennuksissa on kiinnitettävä erityistä huomioita hormivaikutukseen, koska pitkien pystykanavien myötä hormivaikutus voimistuu [19].

Kerroskohtainen ilmanvaihto on käytännössä keskitetty ilmanvaihto, joka palvelee ainoastaan yhtä tai kahta kerrosta. Kerroskohtaisessa ilmanvaihdossa painesuhteiden hallinta on helpompaa, koska ilmanvaihtojärjestelmä palvelee enintään kahta kerrosta. Tällöin painesuhteita on helpompi hallita. [47.] Kerroskohtaisessa ilmanvaihdossa alla olevassa kuvassa 22 on esitetty kerroskohtaisen ilmanvaihdon periaate yhtä kerrosta palvelevana.



Kuva 22. Kerroskohtainen ilmanvaihtojärjestelmä

Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä tulee enemmän palopeltejä ja ilmapääräsäätimiä, jotka vaativat huoltoa ja lisäävät kustannuksia. Kuitenkin järjestelmän etuna on mahdollisuus koneelliseen jäähdytykseen.

Kerroskohtaisen ilmanvaihdon myötä ilmanvaihtokoneita pitää olla muutaman kerroksen välein, mutta niiden koko pysyy suhteellisen pienenä. Keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän korkeus on erityisesti huomioitava jo suunnitteluvaiheessa. Korkeuden myötä kasvavan hormivaikutuksen vuoksi ilmanvaihtojärjestelmät tulee jakaa vyöhykkeittäin erillisjärjestelmiin, tai vaihtoehtoisesti järjestelmä on varustettava hormivaikutuksen kompensoivilla laitteilla, kuten vakiovirtaus- tai ilmamääräsäätimillä. Vyöhykkeittäin jaettujen erillisjärjestelmien sisäänottoaukkojen pystysuorat etäisyydet toisistaan on mahdollista laskea kaavalla 2. [48, s. 32.]

$$D_{max} = 600 / (T_s - T_u) \quad (2)$$

Jossa	D_{max}	Ylimmän ja alimman päätelaitteen korkeusero, m
	T_s	Sisäilman lämpötila, °C
	T_u	Ulkoilman mitoituslämpötila, °C

Yleisen mitoittavan sisälämpötilan +21°C ja 3. säävyöhykkeen mitoituslämpötilan -32°C tilanteessa rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ylimmän ja alimman ulkoilmalaitteen välinen korkeusero saa olla siis enintään noin 11 metriä eli noin kolme tai neljä kerrosta [48, s. 32]. Kanavat, joissa maksimikorkeus ylittyy voi varustaa esimerkiksi kuvassa 23 esitetyn kaltaisella vakiovirtaussäätimellä, joka kompensoi toiminnallaan hormivaikutusta.



Kuva 23. TROX RN-D-vakiovirtaussäädin

Esimerkiksi kuvan kaltainen mekaaninen vakiovirtaussäädin soveltuu vakioilmamääräjärjestelmään, ja se pitää läpi virtaavan ilmamäärän vakiona estäen hormivaikutusta. [49.]

6.1.2 Hajautettu ilmanvaihto

Hajautetulla ilmanvaihdolla tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmää, jossa jokaista asuntoa tai huoneistoa palvelee oma ilmanvaihtokoneensa. Asuntokohtaisessa ilmanvaihdossa painesuhteiden hallinta pysyy myös helpompana, kun ilmanvaihtokoneella palveltava alue pysyy pienenä. Järjestelmä on samankaltainen kuin pientaloissa käytetty. [47.] Kuvassa 24 on esitetty periaate asuntokohtaisen ilmanvaihdon kanavoinnista.

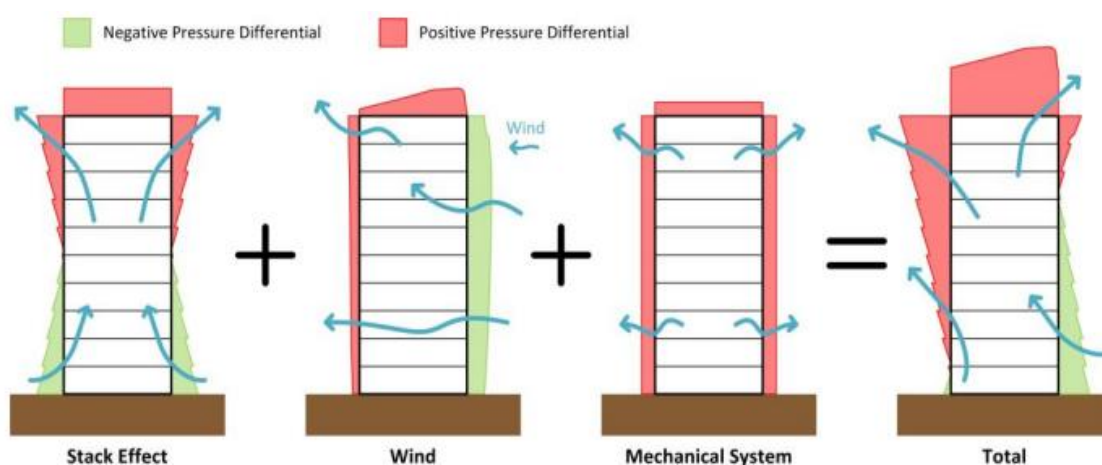


Kuva 24. Asuntokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä

Asuntokohtaisessa hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä jäähdytyksen toteutus ei ole kannattavaa toisin kuin keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä, sillä jäähdytysputkitusta, pattereita ja automaatiota tulisi suuri määrä. Etenkin asuinrakennuksissa ilmanvaihtokoneita on paljon eri puolilla rakennusta, ja ulospuhalluskanavien vienti ylös vesikatolle vie paljon tilaa. Ylöspäin noustessa kanavat lisääntyvät ja niiden tarvitsema tila vain kasvaa. Kuitenkin poistoilmaluokan 1 tiloissa ja usein myös asuntokohteissa on mahdollista käyttää seinäpuhallusta. [46, s. 29.] Seinäpuhalluksessa ulospuhallusilma puhalletaan suoraan talosta pois niin, ettei siitä koidu ääni, haju- tai muutakaan haittaa ympäristölle. Ulospuhallusilman tulisi päästä leviämään vapaasti, eikä se saisi sekoittua ulkoilmalaitteen ottamaan ilmaan. Asuintilojen tapauksessa seinäpuhallus voi kuitenkin joskus vaatia selvityksiä esimerkiksi rakennusvalvonnalle ja jopa virtaussimulointia ehtojen varmistamiseksi. [12.] Seinäulospuhalluksesta enemmän kappaleessa 6.4.

6.2 Painesuhteet

Nykypäivän pyrkimys rakentaa energiatehokkaasti on tehnyt rakennuksen painesuhdetarkasteluista entistä merkityksekkäämpiä, ja korkeassa rakentamisessa rakennuksen vaipan yli vaikuttavat painesuhteet kasvavat. Ilman paine pyrkii tasoittumaan virtaamalla ylipaineesta alipaineeseen, ja sen myötä syntyvät hallitsemattomat virtaukset voivat tuoda rakennukseen kosteus- ja epäpuhtausongelmia. [50.] Kuvassa 25 on kuvattu rakennuksen painesuhteisiin vaikuttavat tekijät ja niiden vaikutus painesuhteisiin.



Kuva 25. Painesuhteisiin vaikuttavat tekijät

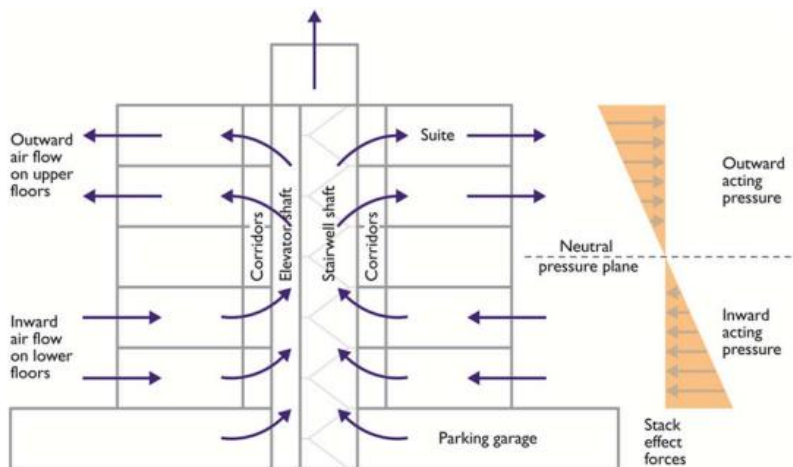
Kuvassa vihreä kuvaa negatiivista paine-eroa ja punainen positiivista paine-eroa. Ensimmäisenä vasemmalla on hormivaikutus, joka kasvaa ulkoilman ja sisäilma lämpötilaeron ja rakennuskorkeuden myötä tehden rakennuksen alaosan alipaineiseksi ja yläosan ylipaineiseksi. Toisena tuuli, joka voi muuttaa rakennuksen painesuhteita ennalta arvaamattomasti, koska tuulisuus on satunnaista ja vaihtelevaa. Kolmantena kuvaajassa on esitetty ilmanvaihto, jonka merkitys painesuhteisiin riippuu ilmanvaihdon säädöistä ja voimakkuudesta. Ilmanvaihto on esitetty ylipaineisena. [50; 14, s. 4–5.]

Edellä mainittujen muuttuvien olosuhteiden lisäksi painesuhteisiin vaikuttaa erityisesti rakenteiden tiiveys. Ilma pyrkii virtaamaan ulkovaipan lävitse ja rakennuksen sisäisestikin muun muassa saumojen, läpivientien, kulkureittien ja kuilujen kautta. [50.]

6.3 Hormivaikutus

Termiset paine-erot eli tutummin hormivaikutus muodostuu sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista, ilmiö voi aiheuttaa rakennukseen veto-ongelmia, kasvattaa lämmitystehontarvetta sekä aiheuttaa toimintaongelmia oviin. Hormivaikutus myös vaikuttaa ilmanvaihdon ilmamääriin ja toimintaan, ellei ilmanvaihtojärjestelmää ole varustettu asianmukaisella paineohjauksella. [14, s. 16; 24.]

Yleinen ilmakehän paine on keskimäärin 101,3 kPa, joka muodostuu tarkastelupisteen yllä olevasta ilmamassasta. Mitä ylempää ilmanpainetta tarkastellaan, sitä vähemmän päällä on ilmamassaa ja tarkastelupisteen ilmanpaine laskee. Ilmanpaineeseen vaikuttavat tarkastelupisteen korkeuden lisäksi maan vetovoima ja ilman tiheys. Ilman tiheys laskee lämpötilan noustessa, ja kasvaa lämpötilan laskiessa. [51.] Ulkolämpötilan laskiessa rakennuksen sisälämpötilaa kylmemmäksi, hormivaikutus alkaa vaikuttamaan [52, s. 10]. Korkeuden myötä vaikutus voimistuu. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu termisten paine-erojen vaikutus rakennusvaipan läpäiseviin ilmavirtoihin.

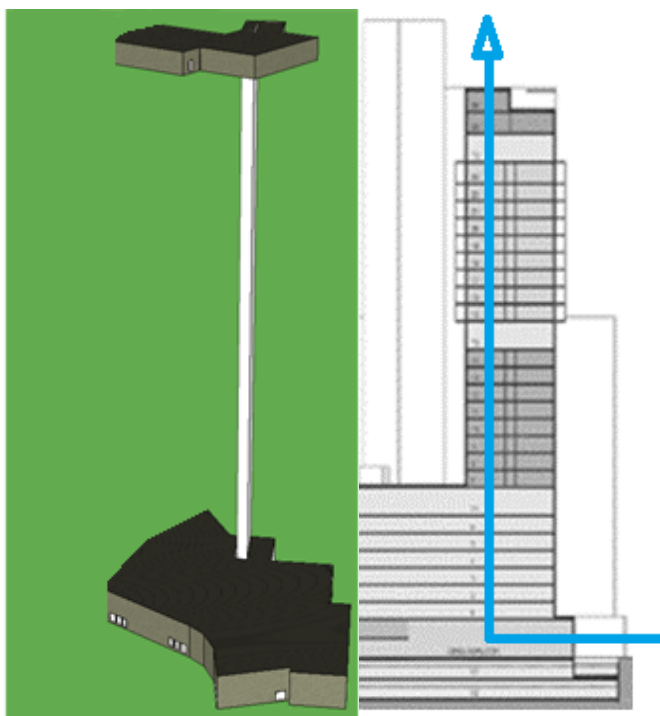


Kuva 26. Hormivaikutus ja neutraali taso

Kylmällä ilmalla termisten paine-erojen myötä rakennuksen yläosaan muodostuu ylipainetta, joka pyrkii tasaantumaan ulkona vallitsevan huomattavasti matalamman paineen kanssa. Rakennuksen alaosassa ilma taaskin pyrkii ulkoa rakennuksen sisään ja virtaamaan rakennusta ylöspäin. Yli- ja alipaineet tasoituvat keskiosan neutraalille painetasolle, jossa rakennuksen sisällä vallitseva paine on yhtä suuri kuin rakennuksen ulkopuolella vallitseva paine. Neutraalin tason sijainti on tapauskohtainen ja vaikeasti määritettävissä ilman painemittauksia, sillä siihen vaikuttavat rakennusvaipan vuotokohdat ja niiden satunnaisesti vaihtelevat virtausvastukset. [50; 14, s. 5–6.]

Rakennuksen hormivaikutuksen suuruusluokka on noin 0,9 Pa/m sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilan ollessa 20°C, ja 1,8 Pa/m lämpötilaeron ollessa 40°C [8; 50]. Hormivaikutuksen neutraalitalanteeksi kutsutaan tilannetta, jossa ulko- ja sisäilman lämpötilaero on alle 5 astetta. Neutraalitalanteessa terminen paine-ero tai sääolosuhteet eivät vaikuta ulkovaipan paine-eroon. Hormivaikutus voi olla myös käänteinen, jos rakennuksen sisäilma on viileämpää kuin ulkoilma. Voimakasta tai pitkäaikaista käänteistä hormivaikutusta Suomen olosuhteissa ei kuitenkaan pääse syntymään. [14, s. 5.]

Termisten paine-erojen vaikutusta on mahdollista simuloida esimerkiksi IDA-ICE-simulointiohjelmalla. Alla olevassa kuvassa 27 on havainnollistettu erään kohteen IDA-ICE-simulaatio, ja rakennuksen leikkauskuvassa hormivaikutuksen suunta aulan ovelta rakennuksen yläosaan asti. [53.]

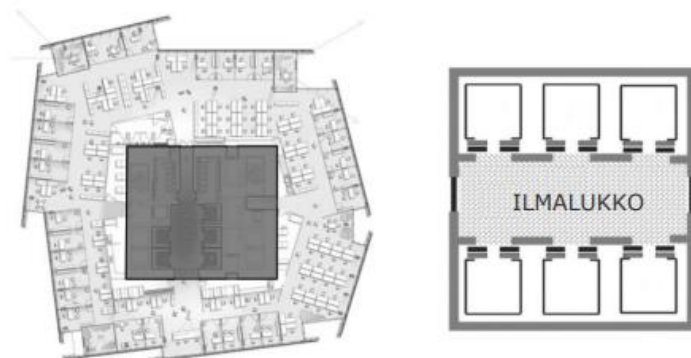


Kuva 27. IDA-ICE-simulaatio ja hormivaikutuksen reitin hahmottelu

Hormivaikutusselvityksen IDA-ICE-simulaatiomalli on yksinkertaistettu niin, että siinä näkyy ainoastaan sisääntulokerros, ylin kerros, kerroksien ovet ja kerroksien väliset hissikuilut. Laskentasovellukseen syötetään rakennuspiirustusten lisäksi rakennuksen q50 ilmatiiveysluku, joka on laskennassa tyypillisesti 2 m³/h/m², sekä ovien ja kuilujen ilmatiiviyys. Laskentamallista saadaan rakennuksen lämmitystehontarve hormivaikutus huomioiden tai ilman, ja mallilla voi simuloida eri menetelmien vaikutusta hormivaikutukseen. [12; 53.]

Hormivaikutukseen voi vaikuttaa taloteknisillä menetelmillä. ASHRAE:n oppaan mukaan korkeassa rakennuksessa ilmanvaihdon ylipaineisuus on keino hillitä hormivaikutusta. Aulojen ja kuilujen ylipaineistaminen vähentää vuotoilmavirtaa, jolloin hormivaikutus heikkenee. Oppaassa suositeltu suhde on 5 % enemmän tuloilmavirtaa kuin poistoa. [26, s. 24–25.] Ranta-ahon [14] tutkimuksen mukaan tilojen ylipaineisuus laskee neutraalia tasoa ja siten vähentää rakennuksen alipaineisia tiloja, veto-ongelmia ja lämmitystehontarvetta [14, s. 12–13]. Ylipaineistaminen on kuitenkin kyseenalainen ratkaisu, koska ylipaineisissa tiloissa on riskinä kosteuden tiivistyminen rakenteisiin. Kosteuden tiivistyminen voi aiheuttaa muun muassa kosteusvaurioita ja terveyshaittoja tilojen käyttäjille. Hormivaikutusta on mahdollista vähentää myös jäähdyttämällä rakennuksen sisäisiä kuiluja, sillä jäähdytys pienentää ulkoilman ja korkean kuilun välistä lämpötilaeroa ja sen myötä termistä paine-eroa. [14, s. 38–39.] Hormivaikutuksen hallintamenetelmät tulee valita hankekohtaisesti rakennuksen ominaisuuksien mukaan ja menetelmien käytöstä tulee neuvotella tiiviissä yhteistyössä kaikkien suunnittelualojen kanssa [8].

Rakenteellisten menetelmien käyttö on tehokkain tapa hillitä hormivaikutusta sekä energia- että kustannusnäkökulmasta. Rakenteelliset menetelmät ovat passiivisia, ja sen myötä myös energiatehokkaampia kuin esimerkiksi kuilujen jäähdyttäminen tai tilojen paineistaminen. Käytännössä rakenteet pyritään tiivistämään, jotta haitallinen vuotoilma vähenee ja pyritään estämään korkeiden ilmayhteyksien muodostuminen, joissa ilma voisi virrata hallitsemattomasti. Hissikuilujen ja porrashuoneiden korkeuden ja avoimuuden vuoksi niissä on lähes väistämättä voimakas hormivaikutus. Pystykuilujen hormivaikutusta voi kuitenkin vähentää osastoimalla kuilut tiiviiksi ja varustamalla ne kerroskohtaisesti kuvan 28 kaltaisilla eteistiloilla eli ilmalukoilla. Näin hormivaikutus ei pääse vaikuttamaan kuilujen kautta kerroksen muihin tiloihin. [14, s. 30–38.]



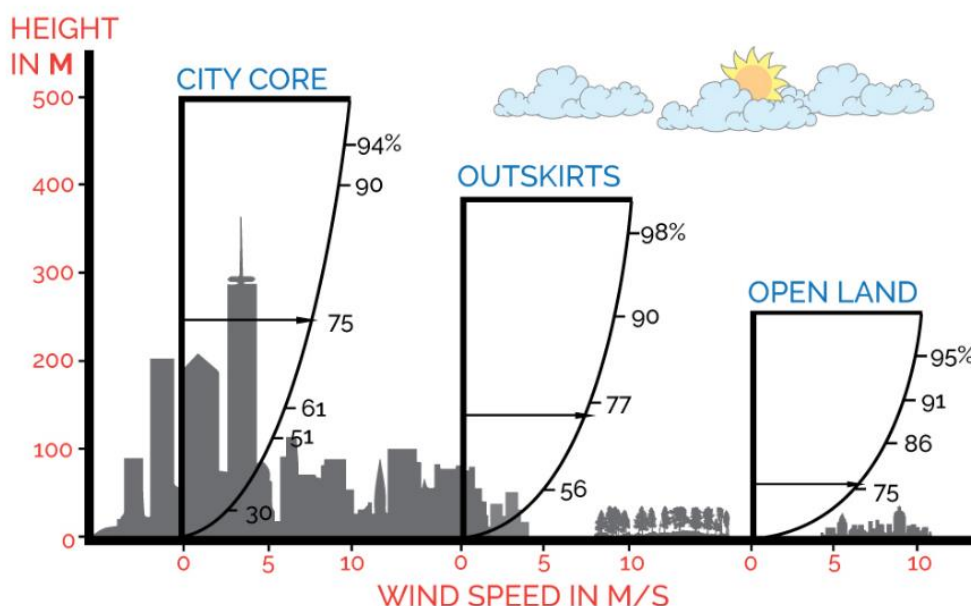
Kuva 28. Kuilujen osastoinnin periaate

Kerroskohtaisten eteisten lisäksi rakennusten ulko-ovet on suositeltavin toteuttaa pyöröovilla tai riittävän pitkällä tuulikaapilla, jotta voimakaskaan hormivai-
 kutus ei haittaa niiden käyttöä ja tiiviys säilyy. Useampi peräkkäinen tiivis
 osastointi vähentää hormivaikutusta. Ruuhkaaipun aikaan on kuitenkin riski,
 että pariovet ovat kauan yhtä aikaa auki muodostaen voimakkaan hormivaiku-
 tuksen. [12.] Pyöröovet ovat kuitenkin suuri huoltokohde, ja ajan saatossa
 pyöröovienkin tiiviys voi heikentyä.

6.4 Tuuli

Mitä korkeammalle mennään, sitä tuulisempaa on. Pakkassäälläkin maan
 päällä voi olla tyyntä, mutta korkealla tuulee jopa kovemmin kuin kesäkuukau-
 sina. [54.] Rakennettaessa korkealle rakennuksen ympärillä ei ole tuulta rajoit-
 tavia tekijöitä, ja korkealla tuulee muutenkin kovemmin. Tuuli voi jopa huojut-
 taa rakennuksia, jos ne ovat riittävän korkeita [13]. Tuuli tuo haasteita siis
 useille suunnittelun aloille. Talotekniikkasuunnittelussa se vaikuttaa painesuh-
 teisiin ja ilmanvaihtoon, mikäli ulospuhalluksessa käytetään seinäpuhallusta
 julkisivusta.

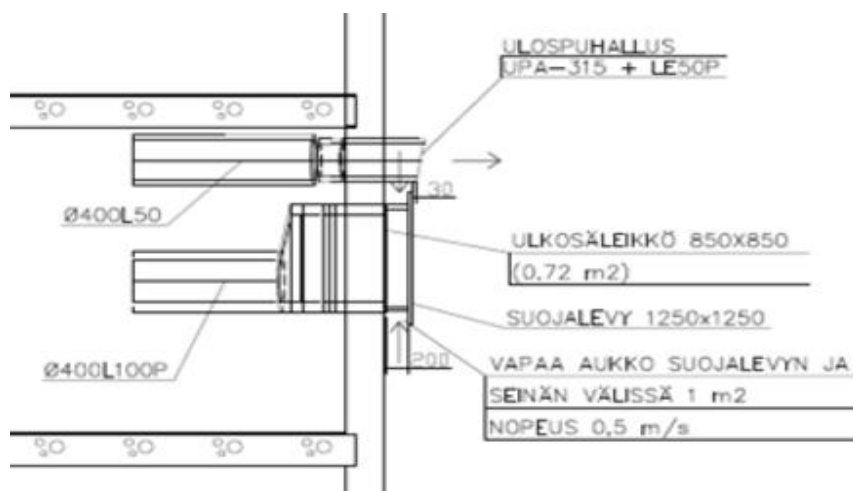
Kuvassa 29 on esitetty tuulen nopeus korkeuden funktiona. Maaston muodot
 ja tekijät, kuten puusto tai rakennukset, vaikuttavat tuulen nopeuden kehitty-
 seen korkeuden kasvaessa [55].



Kuva 29. Korkeus tuulen nopeuden funktiona erilaisissa maastoissa

Kuten aiemmin mainittu, ulospuhallusilman seinäpuhallusta on mahdollista käyttää, mutta korkeissa rakennuksissa ilman tulo- ja poistopisteiden tulee olla sijoitettu tuulen ja nosteen vaikutuksen minimoivalla tavalla [48, s. 14]. Tuulen aiheuttamaa haittaa raitisilmanottoon voidaan pienentää suunnittelemalla raitisilmalaitteen ilmanottoaukko niin, että aukko on suojalevyn takana tuulelta suojassa ja tuuli ei pääse vaikuttamaan suoraan kanavaan. [19.] Ulkoilma- ja ulospuhalluslaitteiden sijoittelu pyritään tekemään siten, että ulospuhallusilman pitoisuus ulkoilmalaitteen imuaukon kohdalla olisi mahdollisimman pieni. Yhdistelmälaitteita voi kuitenkin myös käyttää, jolloin kanavointi on helpompaa. [12.]

Kuvassa 30 on esitetty leikkauskuva seinäasenteisista ulkoilma- ja ulospuhallusilmalaitteista, jossa raitisilmanotto on varustettu tuulelta suojaavalla suojalevyllä. Raitisilma-aukon peittävä suojalevy ei kuitenkaan saa rajoittaa tarvittavaa vapaata imuaukkoa, ettei imupisteen nopeus kasva liian suureksi. [12.] Liian suurella imunopeudella on riskinä muun muassa lumen päätyminen ulkoilmakanavaan.

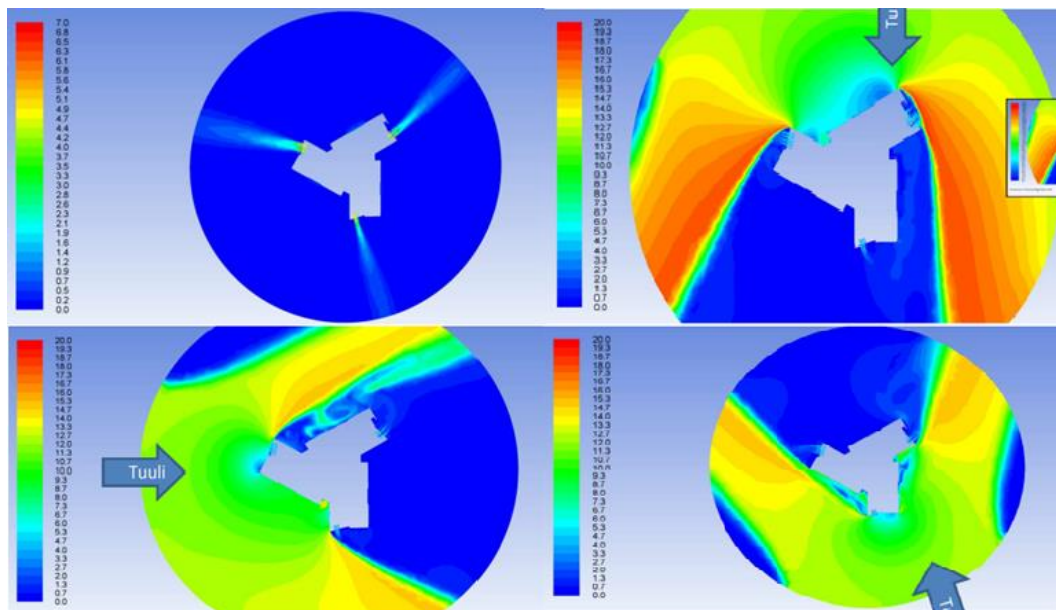


Kuva 30. Periaatepiirros korkean rakennuksen yhdistetystä ulospuhallus- ja ulkoilmalaitteesta keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä

Tuulen suunnan ollessa suoraan vasten seinässä olevaa ulospuhallusaukkoa on riskinä, että tuuli on voimakkaampi kuin ilmanvaihtokoneen ulospuhallus. Tällöin huoneiston ilmanvaihto ei toimi oikein, vaan kylmä ulkoilma voi jopa kulkea kanavaa pitkin rakennuksen sisään ilmanvaihtokoneelle. Tämä ongelma koskee pääasiassa vain asuinhuoneistojen pieniä huoneistokohtaisia ilmanvaihtokoneita, joissa on vain pieni paineenkorotus ulospuhalluskanavaan. [12.]

Ratkaisuna tähän on valita huoneistoihin normaalia suurempaan paineentuottoon kykenevät ilmanvaihtokoneet. Tavanomainen huoneistokohtainen ilmanvaihtokone järkevällä SFP-luvulla kykenee noin 100–200 Pascalin paineentuottoon. Tuulen vaikutuksen voittamiseksi tulee valita ilmanvaihtokone, joka kykenee jopa 400 Pascalin paineeseen ulospuhalluskanavassa. Riittävän paineenkorotuksen saavuttamiseksi voi joutua käyttämään valmistajan tavanomaisesta mallistosta puhallinkäyrältään poikkeavia ilmanvaihtokoneita. [12.] Tavanomaisesti seinäpuhalluksessa nopeuden tulee olla tehostamattomana vähintään 5 m/s, etteivät ulospuhallus- ja raitisilma sekoitu keskenään [46, s. 35]. Korkealla tuulee voimakkaammin ja ulospuhallusilman puhallusnopeuden tulee olla vielä suurempi – jopa 8 m/s. Suuri puhallusnopeus ehkäisee myös jääpuikkojen muodostumista kosteasta ulospuhallusilmasta. [12.]

CFD-simulointi, eli numeerinen virtausdynamiikkasimulointi (engl. Computational Fluid Dynamics simulation) on menetelmä, jonka avulla on mahdollista analysoida fluidin liikettä. LVI-suunnittelussa tuulen ja ulospuhalluksen yhteisvaikutusta on mahdollista simuloida CFD-simuloinnin avulla, ja toisinaan rakennusvalvonta jopa vaatii sitä. [12.] CFD-simulointi on Helsingin kaupungin rakennusvalvonnan hyväksymä tapa todentaa ulospuhallusilman leviäminen ja yhteisvaikutus tuulen kanssa [56].



Kuva 31. Kuvakaappaus erään rakennuksen CFD-simulaatiosta

CFD-mallinnuksen avulla voidaan tarkastella ulospuhallusilman pitoisuutta ulkoilmavirran imuaukolla, ja ulospuhallusilman kulkeutumista ikkunoiden, parvekkeiden ja ulkoilmalaitteiden luo eri sääolosuhteissa [56].

7 TEKNISET TILAT

Korkeissa rakennuksissa tulee varautua suurempaan teknisten tilojen tarpeeseen kuin matalammissa rakennuksissa. Yleisen teknisen laitetilän sijoitusperiaatteen mukaan yhdyskuntatekniikan järjestelmien liitynnät tulisi olla samassa paikassa. Näitä järjestelmiä ovat muun muassa vesi, sähkö ja tietoliikenne sekä esimerkiksi kaukolämpö tai muut vastaavat lämmöntoimitustavat. [16, s. 4.] Nämä tilat painottuvat lähes poikkeuksetta rakennuksen alimpiin kerroksiin. Tekniikka halutaan mieluummin sijoittaa rakennuksen alaosaan myös siksi, koska ylemmät kerrokset ovat usein halutumpia muuhun käyttöön ja niiden neliöhinta voi olla huomattavasti suurempi. Ylempänä rakennuksessa voi olla kuitenkin useita tilaa vieviä ilmanvaihdon konehuoneita ja teknisiä tiloja nestejärjestelmien välisiirtimille ja paineenkorotusasemille.

Rakennuksen alaosassa sijaitsevista lämmönjako- ja kylmätekniikkahuoneista on suositeltavaa suunnitella suorat pysty-yhteydet koko rakennuksen läpi, koska putkimäärä on normaalia suurempi muun muassa vyöhykejaon vuoksi. Ylempien kerrosten tiloja säästyy, kun tekniikkaa ei tarvitse siirtyä sivuttaisuunnassa kuilusta toiseen ja kotelot pysyvät pienempinä. Tekniikkakerrosten tai -tilojen vaatima korkeus määräytyy tekniikan tilantarpeen mukaan, ja se voi siten poiketa muista kerroksista. Usein ne pyritään pitämään matalina, koska ne ovat toissijaisia tiloja, mutta LVI-suunnittelijan on huolehdittava kerroskorkeuden riittävydestä laitteille ja niiden kytkennöille. [8.] Myös Elpo-pystyhormien tai vastaavien esivalmisteiden käytöllä on mahdollista säästää tilaa, tällöin on tehtävä tiivistä yhteistyötä rakennesuunnittelun kanssa.

Suunnittelussa ja teknisten tilojen varauksissa on huomioitava myös rakennuksen elinkaari ja muuntojoustavuus. Esimerkiksi jos kohteen tilojen käyttötarkoitukset muuttuvat rakennuksen elinkaaren aikana ja uutta tekniikkaa joudutaan lisäämään, niin mahdollisiin muutoksiin on hyvä varautua jo suunnitteluvaiheessa tekniikan tilantarpeita mitoittaessa kuiluihin ja muihin teknisiin tiloihin.

8 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämä opinnäytetyö oli selvitysluontoinen tutkimus, jonka tutkimusmenetelmät olivat pääasiassa kvalitatiivisia. Työssä käytettyjä laadullisia tutkimusmenetelmiä olivat muun muassa kirjallisten lähteiden tutkiminen, ideointi sekä asiantuntijoiden haastattelut ja lähteiden analysointi. Suurin osa tiedosta kerättiin kirjallisuusselvityksenä, jonka myötä kirjallisia lähteitä työhön kertyi noin 50. Kirjallisia lähteitä haettiin aihealueen hakusanoilla internetin, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun sekä toimeksiantajayrityksen organisaation tietokannoista. Kirjallisuuslähteiksi valikoituneet lähteet ovat työn aiheelle ominaisia artikkeleita, tutkimuksia, lakitekstejä sekä tuotevalmistajien tarjoamia tietoja.

Työtä varten haastateltiin myös asiantuntijoita useista eri organisaatioista, jotka olivat muun muassa tuotevalmistajien edustajia, Kuopion rakennusvalvonta ja Granlund Oy:n emoyhtiössä työskentelevät korkean rakentamisen asiantuntijat. Haastatteluissa kysytyt kysymykset liittyivät haastateltavien osaamisalueeseen korkean rakentamisen näkökulmasta. Haastattelujen ja kirjallisten lähdeaineistojen analyysin myötä lähteistä ja niiden sisällöistä valikoitiin työn kannalta relevantit tiedot käytettäväksi tutkimuksessa. Aiheet, jotka korkean rakentamisen lisäksi ovat yleisesti käytössä matalassa rakentamisessa jätettiin pois, jotta työn aiheen rajauksessa pysytään. Työn raportoinnin lisäksi työssä selvinneet asiat koottiin yksinkertaisempaan muistilistamaiseen muotoon tilaajalle käytettäväksi.

Lähteiden valintaan vaikutti myös niiden laatu ja luotettavuus. Laatua ja luotettavuutta arvioitiin niiden alkuperän ja sisällön perusteella. Työhön ei myöskään valittu käytettäväksi sellaisia ulkomaisia lähteitä, joiden sisältö painottui muualla käytettäviin toteutusmenetelmiin, jotka eivät ole Suomessa yleisesti sallittuja tai toimivia. Toimeksiantajayrityksen kannalta olennaisia selvityksen kohteita ovat sellaiset menetelmät, joita se voi tulevaisuudessa hyödyntää LVI-suunnittelussa.

9 YHTEENVETO

Työssä selvitettiin rakennuskorkeuden vaikutus LVI-järjestelmien toimintaan, ja avattiin korkealle rakentamiselle tyypillisiä normaalista poikkeavia LVI-järjestelmien toteutusperiaatteita ja -menetelmiä. Selvityksen pohjalta tilaajalle laadittiin muistilistatyyppinen asiakirja korkean rakentamisen hankkeita varten.

Lämmitys ja jäähdytysjärjestelmien osalta korkean rakennuksen suunnittelussa on ensisijaisesti huomioitava riittävä tehontarvelaskenta, joka on kannattavinta tehdä kerroskohtaisesti siihen soveltuvalla monivyöhykelaskentamallilla. Kerroskohtaisen vuotoilman ja tuulen merkitys korostuu, ja niiden laskenta voi olla vaikeaa ilman dynaamista simulointiohjelmaa, jolloin on riskinä lämmitys- tai jäähdytystehon alimitoitus. Toisena asiana on vyöhykejaon ja toteutusmenetelmien valinta toteutuvan käyttöpaineen perusteella. Käyttöpaineen ja vyöhykejaon valinnan edellytyksenä on myös tilojen tarpeet ja tilaajan toiveet esimerkiksi lämmitysmuodon ja laitteiden osalta, jotka määrittävät käyttöpaineen suuruutta. Vyöhykejakoon voi myös vaikuttaa tilojen käyttäjien jakautuminen. Jos esimerkiksi suuri osa rakennuksen keskiosasta on toimistotiloja, voi yhden vyöhykkeen toteuttaa sille alueelle. Tämä helpottaa muun muassa lämmitysenergian mittausta ja tulevaisuuden muutos- tai huoltotoimenpiteitä.

Käyttövesijärjestelmien suunnittelussa rakennuskorkeus tuo haasteita sopivan painetason saavuttamiseksi jokaiselle vesipisteelle, toisaalta tämä ei poikkea paljoa tavanomaisesta matalan rakennuksen suunnittelusta. Kuten lämmitys- ja käyttövesijärjestelmienkin suunnittelussa, käyttövesiverkostot on usein jaettava pystyvyöhykkeisiin käyttöpaineen mukaan. Paineenkorotus- ja alennuslaitteiden käyttö on valittava tapauskohtaisesti sopivaksi kussakin kohteessa kustannusten, energiatehokkuuden ja käyttövarmuuden perusteella. Korkeiden rakennusten viemärijärjestelmien suunnittelu ei juurikaan poikkea matalasta rakentamisesta, sillä Etelä-Suomessa toteutettujen hankkeiden viemärijärjestelmät ovat todettu täysin toimiviksi ilman mahdollisia erikoisratkaisuja. Poikkeuksena pystyviemäriin alaosan paineenvapautuslinja, jota ei yleisesti ole käytetty, mutta on yksinkertainen ja hyödyllinen keino edistää tuuletusta ja estää hajulukkojen tyhjentymistä kovan kuormituksen aikana.

Ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelu pohjautuu suurelta osin tilojen käyttötarkoituksiin. Korkeat rakennukset ovat usein jaettu useisiin eri pystyvyöhykkeisiin niin talotekniikan, kuin käyttötarkoitustenkin perusteella. Usein rakennusten alaosat ovat varattu liiketiloille, keskiosassa toimistotiloja ja ylhäällä asuntoja. Liike-, toimisto- ja hotellitilat ovat usein toteutettu keskitetyllä ilmanvaihtojärjestelmällä, jolloin tiloja palvelee niiden yläpuolella sijaitseva suurempi ilmanvaihtokone. Ravintoloiden sijoittelussa rakennukseen on huomioitava ulospuhallusilma, joka on puhallettava ulos katon kautta. Tornin läpi ulospuhalluskanavaa ei kannata viedä, vaan ravintola kannattaa sijoittaa ylös tai esimerkiksi rakennuksen alaosan siipeen. Asuintilat on mahdollista toteuttaa myös keskitetyllä järjestelmällä, mutta usein käytetään huoneistokohtaisia pienempiä ilmanvaihtokoneita. Ulospuhallusilman seinäpuhallus on tärkeä osa korkean rakennuksen ilmanvaihtoa koska vesikatolle johdettavia ulospuhalluskanavia on vaikea toteuttaa, ja hormivaikutuksen myötä pitkiä pystykanavaveitoja ei suositella. Seinäpuhallusta varten usein vaaditaan CFD-simulointia, jolla todistetaan ja varmistetaan järjestelmän oikeanlainen toimivuus myös ääriolosuhteissa.

Termiset paine-erot eli hormivaikutus korostuu rakennuskorkeuden kasvaessa. Ilmiön hallinta on useiden suunnittelualojen tehtävä, mutta LVI-suunnittelijan tehtävä korostuu sen huomioidussa. Hallitsemattomat painesuhteet voivat aiheuttaa vetoa, hajujen leviämistä, ilmanvaihdon ja ovien toimintaongelmia ja suurempia lämpöhäviöitä. Simulointimallilla tehtävän laskennallisen painesuhdetarkastelun avulla simuloidaan ratkaisuja jo suunnitteluvaiheessa, ja valitaan tehokkaimmat ratkaisut kohteen perusteella.

Helsingin kaupungin korkean rakentamisen rakentamistapaohjeen ohjekortit kattaa tärkeimmät suunnittelussa huomioitavat poikkeukselliset asiat, ja se on yleispätevä opas kaikkiin korkean rakentamisen kohteisiin myös useissa muissa kaupungeissa. Ohjekorteissa ei kuitenkaan käydä lainkaan läpi käytännön menetelmiä, joita tässä tutkimuksessa selvitettiin. LVI-tekniikan osalualueilla käytettävät menetelmät ja niissä huomioitavat asiat vaihtelevat hankekohtaisesti.

10 POHDINTA

Korkean rakentamisen hankkeissa on tehtävä tiivistä yhteistyötä muiden suunnittelualojen kanssa, koska myöskään heiltä ei välttämättä löydy kokemusta korkeassa rakentamisessa käytettävistä poikkeuksellisista menetelmistä. Esimerkiksi arkkitehtisuunnittelu ei voi suoraan olettaa kaiken tekniikan sijaitsevan rakennuksen alaosassa, vaan poikkeuksellisesti myös välikerroksiin saatetaan joutua varaamaan tilaa talotekniikalle. Rakennesuunnittelua on tiedotettava tilojen mahdollisesta ylipaineisuudesta, jolloin rakennesuunnittelija tietää huomioida ylipaineisuuden kosteusteknisessä tarkastelussa. LVI-suunnittelun normaalia voimakkaampi ohjaava vaikutus korostuu siis myös tilasuunnitteluun sekä rakenneasioihin.

Suunnittelussa on kannattavaa huomioida rakennuksen elinkaaren tarpeet riittäväällä muuntojoustavuudella. Simuloinnin avulla on mahdollista kartoittaa lämmityksen ja jäähdytyksen tarvetta tulevaisuuden säädataa hyödyntäen. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien vyöhykejakoperiaatteet ovat periaatekaaviossa yksinkertaisia. Kuitenkin jos samassa järjestelmässä on useita eri alueita toteutettavana eri rakennepaineilla ja eri osilla, voi olla riski, että osat menevät työmaalla sekaisin.

Jos rakennuksessa on paljon tekniikkaa ja useita erityyppisiä verkostoja, niin suunnittelutyön selkeyttämiseksi on kannattavaa laatia verkostojen koontitaulukko. Koontitaulukosta selviää helposti eri verkostojen positiot, nestetyypit, käyttötarkoitukset, käyttö- ja rakennepaineet, lämpötilatasot ja muut olennaiset asiat.

Työstä rajattiin palotekniikka kokonaan pois, jossa LVI-tekniikka on suuressa osassa esimerkiksi osastoivien laitteiden ja mahdollisen sprinklerijärjestelmän myötä. Hanketta suunniteltaessa on huomioitava myös nämä asiat tarkasti, esimerkiksi sprinklerin vaatimat tilavaraukset koko rakennuksen läpi.

Käyttöönoton huomiointi on oleellinen osa rakennushanketta, ja suuressa korkean rakentamisen kokonaisuudessa se on suoritettava huolellisemmin kuin tavanomaisessa matalassa rakennuksessa. Esimerkiksi käyttöveden juoksu-putki on suoritettava työselosteen ohjeistuksen mukaisesti, jotta kupariputken

pintaan syntyy suojakerros. Käyttöönoton juoksutuksessa muodostuneen suojakerroksen ansiosta kupariputki ei kulu puhki niin nopeasti.

Samalla työssä pystyi helposti kartoittamaan yhtiön valmiutta toteuttaa mahdollista korkean rakentamisen hanketta, kun tutkimuksessa selvitettiin edellytyksiä korkean rakentamisen hankkeen toteutukseen. Yhtiön toimipisteessä on kokemusta muutamasta korkean rakentamisen hankkeesta, mutta ei paljoa kokemusta korkeasta asuinrakentamisesta. Poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän omaavia suunnittelijoita toimipisteellä on vain muutama, ja nämä suunnittelijat eivät ole paljoa mukana asuinrakennusten suunnittelussa – korkeiden rakennusten ollessa usein vähintään osittain asuinrakennuksia. Myös korkean rakentamisen hankkeen kolmannen osapuolen tarkastajan tulee olla PV-pätevyys omaava. Jotta yhtiö voi varautua tulevaisuudessa mahdollisiin korkean rakentamisen hankkeisiin, tulee suunnittelijapätevyyksien lisäksi koulutautua työssä mainittujen erikoissimulointien hallinnassa. IDA-ICE-osaaamista yhtiöstä löytyy, mutta painesuhdelaskenta ja CFD-simulointi on harvinaisempaa talotekniikkasuunnittelussa. CFD-simulointi on talotekniikassa harvinaista ja lähtökohtaisesti vain haastavissa kohteissa käytettyä. Se ei kuulu tavanomaiseen LVI-suunnittelijan toimenkuvaan, vaan sen tekee asiaan perehtynyt ulkopuolinen toimija.

Aiheen tutkimisen kautta työ on opettanut paljon LVI-tekniikan periaatteista niin korkeassa rakentamisessa kuin muutenkin. Korkeassa rakentamisessa huomioitavia asioita on ollut helppo peilata ”tavalliseen” LVI-suunnitteluun jokaisella LVI-tekniikan osa-alueella. Olen itse tyytyväinen tutkimuksen lopputulokseen. Tutkimuksesta ja sen tuloksista on hyötyä yhtiölle korkean rakennuksen suunnittelutehtävään valmistautumiseen sekä toteutukseen. Yhtiön on myös mahdollista hyödyntää joitain työssä esille tulleita toteutusvaihtoehtoja muidenkin kuin korkeiden rakennusten suunnittelussa. Esimerkiksi pystyviemärin alaosaan asennettava paineenvapautuslinja on edullinen lisä muihinakin kohteisiin, jossa on riskinä tuuletuksen katkeaminen esimerkiksi raskaan kuormituksen aikana. Tilaajan kanta on, että työn tulokset ovat yleissivistäviä kaikille LVI-suunnittelijoille ja varsinkin niille, jotka tekevät esimerkiksi keski- korkeiden rakennusten tai asuinrakennusten suunnittelua. Tärkeimmiksi asioiksi mainittiin hormivaikutuksen huomiointi ja siihen varautuminen,

pystyviemärin paineenvapautuslinja ja osaamisen kehittäminen erikoissimulointien osalta.

Nykypäivänä on keskitytty enemmän tulevaisuuden ilmaston ja säädatan huomioimiseen, jotka on mahdollista ottaa huomioon esimerkiksi lämmityksen ja jäähdytyksen tehontarvelaskennassa, kun rakennuksesta tehdään dynaaminen laskentamalli. Asetuksessa 1009/2017 mainittu asunnon lämpötilan maksimiarvo $+27^{\circ}\text{C}$ voi olla haastava alittaa varjottomassa korkeassa rakennuksessa ilman aktiivista jäähdytystä. Usein hankkeissa säästetään ja aktiivista jäähdytystä ei haluta asentaa, joten asia on otettava esille hankkeen tilaajan kanssa.

Aiheen tutkimustyötä olisi mahdollista jatkaa esimerkiksi tutkimalla tarkemmin eri vaihtoehtojen hyötyjä ja haittoja tietyissä kohteissa, eli mihin mikäkin esitetyistä ratkaisuvaihtoehdoista soveltuu parhaiten. Vaihtoehtojen välillä voisi tehdä myös kustannusvertailua, jossa huomioidaan hankinta-, asennus- ja elinkaarikustannukset. Tutkimuksessa keskityttiin pääasiassa kaukolämmityksellä toteutettaviin kohteisiin, joka on toisaalta yleinen koska korkeat rakennukset sijaitsevat usein kaava-alueella, jossa kaukolämpö on saatavilla. Jatko-tutkimuksena voisi tutkia esimerkiksi aihetta hybridiratkaisujen näkökulmasta, koska niillä on mahdollista tuottaa myös jäähdytystä. Lisäksi lämpöpumput pienentävät ostoenergian tarvetta ja hiilijalanjälkeä. Tutkimuksen aikana pohdittiin myös suureksi mitoitettun käyttövesiputken limoittumista silloin, kun se on pitkään vähällä käytöllä. Liian pienellä virtaamalla putket voivat kalkkeutua, mutta myös limoittumisesta on käytännön kokemusta, kuitenkin tutkimuksia limoittumisesta ei löytynyt.

LÄHTEET

1. Seppänen, O., Lehtovaara, J., Al Baraazi, A., Pikas, E., Tetik, M. & Zhao, J. Building 2030 korkea rakentaminen. Aalto yliopisto. PDF-dokumentti. 2021. Saatavissa: <https://act.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2022-04/Building2030-korkea-rakentaminen-loppuraportti.v1.pdf> [viitattu 08.09.2022].
2. Council on tall buildings and urban habitat. Tall building criteria. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ctbuh.org/resource/height> [viitattu 08.09.2022].
3. SRV. Pilvenpiirtäjät rantautuvat Suomeen. WWW-dokumentti. 2021. Saatavissa: <https://www.srv.fi/stories/pilvenpiirtajat-rantautuvat-suomeen/> [viitattu 08.09.2022].
4. Helsingin kaupunki. Helsinki määrittelee korkean rakentamisen periaatteet: Korkea rakentaminen on mahdollista historiallista kaupunkikuvaa vaarantamatta. WWW-dokumentti. 2011. Saatavissa: <https://www.uut-tahelsinki.fi/fi/uutiset/2011-11-24/helsinki-maarittelee-korkean-rakentamisen-periaatteet-korkea-rakentaminen> [viitattu 08.09.2022].
5. Kuopion kaupunki. Korkean rakentamisen selvitys. PDF-dokumentti. 2009. Saatavissa: <https://www.kuopio.fi/documents/7369547/7526280/Korkearakentaminen.pdf/beff03fd-ae4e-4ef3-a823-beb0f5e2eb09> [viitattu 01.10.2022].
6. Maankäyttö- ja rakennuslaki 05.02.1999/132
7. Helsingin kaupunki. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018. Ohjekortit. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTAPA-OHJE_OHJEKORTIT.pdf [viitattu 09.05.2022].
8. Tyni, J. & Hotakainen, J. Korkeiden rakennusten LVI-tekniikka-tietoisku. Powerpoint-diasarja. Granlund Oy. 2018.
9. Valtioneuvoston asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaativuusluokkien määräytymisestä 12.03.2015/214
10. Toivonen, T. LVI-insinööri. Sähköpostiviesti 17.11.2022. Kuopion kaupungin rakennusvalvonta.
11. TOPTEN-rakennusvalvonnat. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: <https://toptenrava.fi/doc/tulkintakortit/MRL-120f04A.pdf> [viitattu 2022].
12. Jaatinen, J. Johtava asiantuntija. Microsoft Teams- ja sähköpostikeskustelut 14.10.2022. Granlund Oy.
13. Sweco. Up in the air – Korkean rakentamisen ilmiöt ja haasteet ratkaistaan suunnittelijan työpöydällä. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://blogs.sweco.fi/kestava-rakentaminen/up-in-the-air-korkean->

[rakentamisen-ilmiot-ja-haasteet-ratkaistaan-suunnittelijan-tyopoydalla/](#) [viitattu 09.09.2022].

14. Ranta-aho, I. Hormivaikutuksen aiheuttamien painesuhteiden ja ilmavirtojen hallinta korkeissa rakennuksissa. Aalto-yliopisto. Diplomityö. 2016.
15. Hautala, M. & Peltonen, H. Tekniikan fysiikka, Osa 1. 11. painos. Saarijärvi: Saarijärven OFFSET Oy. 2014.
16. Energiateollisuus. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2020. PDF-dokumentti. 2020. Saatavissa: https://energia.fi/files/5423/JulkaistuK1_2020_Energiateollisuus_ry_%28paiv._20201119%29.pdf [viitattu 09.09.2022].
17. ITT Oy. Pumput ja putkistot teoriassa ja käytännössä. PDF-dokumentti. s.a. Saatavissa: <https://docplayer.fi/10831023-Pumput-ja-putkistot-teoriassa-ja-kaytannossa-miellyttavan-sisailman-lampotilan-kustannustehokas-hallinta.html> [viitattu 09.05.2022].
18. SFS EN1333 Putkiston osat, PN määritelmä ja valinta.
19. Ahti-Virtanen, J. Suomessa korkea on maltillista. *Projektiutiset*. WWW-dokumentti. 2019. Saatavissa: <https://www.projektiutiset.fi/suomessa-korkea-on-maltillista/> [viitattu 9.5.2022].
20. Purmo Group Finland Oy. Compact, C. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.purmo.com/fi-fi/tuotteet/lammitys/radiaattorit/paneeliradiaattorit/vaakasuntaiset-radiaattorit/compact,-c> [viitattu 08.08.2022].
21. Purmo Group Finland Oy. Kon Ventil, KON KV. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.purmo.com/fi-fi/tuotteet/lammitys/radiaattorit/konvektorit/konvektori/kon-ventil,-kon-kv> [viitattu 08.08.2022].
22. Uponor Suomi Oy. Uponor-lattialämmitysjärjestelmä 10 bar. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.uponor.com/getmedia/93b0dcbf-3fa4-4174-bb1c-ff1286b24db3/Uponor-PI-UFH-10-bar-FI-1121024-v2-202105?sitename=Finland&disposition=attachment> [viitattu 04.10.2022].
23. Laasonen, N. LVIJ-järjestelmien kustannusoptimointi korkeissa asuin-kerrostaloissa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. YAMK-opinnäytetyö. 2018.
24. LVI11-10472. Rakennustieto. Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus. 2011.
25. Rönblad, J. Myyntipäällikkö. Microsoft Teams-kokous ja sähköpostikeskustelu 26.10.2022. Reflex GmbH.
26. Ross, D. HVAC-Design Guide for Tall Commercial Buildings. Atlanta: ASHRAE Inc. 2004. PDF-dokumentti.

27. Reflex Oy. Variomat paineenpito ja kaasunpoistoautomaatti. Armatec Oy. PDF-dokumentti.
28. RT103447 Rakennustieto. Putkistojen ja kanavien kannatus. 2022.
29. LVI 12-10330. Rakennustieto. Putkistojen lämpölaajeneminen. 2001.
30. Srinivasa Rajkumar, B. & Nielsen, A. Water distribution in high rise buildings. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf> [viitattu 08.11.2022].
31. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista 22.12.2017/1047
32. Grundfos Oy. Grundfos product center -mitoitussovellus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://product-selection.grundfos.com/fi> [viitattu 08.11.2022].
33. Motiva. Energiat ehokkaat pumput. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/5343/Energiat ehokkaat_pumput.pdf [viitattu 08.11.2022].
34. Grundfos Oy. Hydro MPC-E. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://product-selection.grundfos.com/fi/products/hydro-mpc/hydro-mpc-e?tab=models> [viitattu 08.11.2022].
35. Oras. 4330 vakiopaineventtiili. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://storage.googleapis.com/inriver-data/oras/master/ready/files/original/15823_4330_Vakiopaineventtiili.pdf [viitattu 14.11.2022].
36. Aquatherm. Aquatherm and high-rise construction. WWW-dokumentti. 2014. Saatavissa: <https://aquatherm.com/tech-bulletins/aquatherm-and-high-rise-construction> [viitattu 14.11.2022].
37. Talotekniikkainfo. Vesijohtopaineen muuttaminen. WWW-dokumentti. Päivitetty 22.6.2022. Saatavissa: <https://talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/19-vesijohtopaineen-muuttaminen> [viitattu 9.5.2022].
38. Caleffi Hydronic Solutions. Domestic Hot water recirculation in high rise buildings. Youtube. Videoleike. Julkaistu 01.10.2019. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=6RbSAizV3sE> [viitattu 14.11.2022].
39. Makkonen, M. Tuotepäällikkö. Sähköpostikeskustelu. 11.10.2022. Paroc Oy.
40. Paroc Oy. Calculus -laskentasovellus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://calculus.paroc.com/paroc-calculus/#/> [viitattu 12.10.2022].
41. Geberit Oy. Supertube, tilaa säästävä järjestelmä. PDF-dokumentti. s.a. Saatavissa: https://assets.geberit.fi/local-media/pdf/supertube-brochure.pdf?_gl=1*1c6vzpp*_ga*MTA0NDI1MjQ3OC4xNjY2MjY1Nzc

[y* ga 4F3FVSFHDR*MTY2ODk4MTM2OS40LjA-uMTY2ODk4MTM3MS4wLjAuMA](#) [viitattu 15.10.2022].

42. Geberit Oy. Geberit Sovent Planning Manual. PDF-dokumentti. 2014.
43. Dawson, F. & Kalinske, A. Report on hydraulics and pneumatics of plumbing drainage systems. Iowa: State University of Iowa. PDF-dokumentti. 1937. Saatavissa: <https://iro.uiowa.edu/esploro/outputs/book/Report-on-hydraulics-and-pneumatics-of/9984111206702771#file-0> [viitattu 06.09.2022].
44. Lining Oy. Pohjakulma. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lining.fi/tuotteet/talotekniikka/pohjakulma> [viitattu 05.09.2022].
45. Polypipe. Base Stack/Transition Areas. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.polypipe.com/sites/default/files/Technical Bulletin 5 Base Stack Transition Areas.pdf> [viitattu 10.10.2022].
46. Talotekniikkainfo. Sisäilmasto- ja ilmanvaihto -opas. PDF-dokumentti. 2018.
47. Fläktgroup asuntoilmanvaihdon ratkaisuja. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=8a24fe53-2a7f-4b51-8c5e-c9b84247ce6c> [viitattu 05.09.2022].
48. SFS CEN/TR 16798-4 Rakennusten energiatehokkuus. Rakennusten ilmanvaihto. Osa 4. Muiden kuin asuinrakennusten ilmanvaihto - ja huoneilmastointijärjestelmien tehokkuusvaatimukset. 2017.
49. Teknocalor. Vakiovirtaussäädin RN-D/125/D2. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.teknocalor.fi/vakiovirtauss%C3%A4%C3%A4din-rn-d-125-d2-i420rnd12> [viitattu 25.10.2022].
50. Sisäilmayhdistys Ry. Ilmavirtaukset rakennuksessa. WWW-dokumentti. 2008. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa> [viitattu 01.11.2022].
51. Foreca. Ilmanpaine kertoo, kuinka paljon ilma painaa päälläsi. WWW-dokumentti. Päivitetty 22.1.2021. Saatavissa: <https://www.foreca.fi/s%C3%A4%C3%A4pedia/fnrppkb8> [viitattu 14.11.2022].
52. A-insinöörit. Tiiviiden asuinrakennusten ilmanvaihdon suunnitteluohje paine-erojen hallintaan. PDF-dokumentti. 2021. Saatavissa: https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/tiiviiden_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_suunnitteluohje_paine-erojen_hallintaan_19.3.2021.pdf [viitattu 01.11.2022]
53. Granlund Oy. Sisäinen projektitietokanta. Korkean rakennuksen hormi-vaikutusselvitys.

54. Tuulivoimayhdistys. Myytti: Talvella ei tuule. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/myytille-kyytia/myytti-1-talvella-ei-tuule> [viitattu 14.10.2022].
55. De Rooij, D. Location factor for wind and solar. Sinovoltaics. Saatavissa: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/location-factor-for-wind-and-solar/> [viitattu 14.10.2022].
56. Eurofins. Varmista virtaussimuloinnilla asuntojen jäteilman seinäpuhalluksen määrystenmukaisuus ja toimivuus. WWW-dokumentti. 2019. Saatavissa: <https://www.eurofins.fi/expertservices/ajankohtaista/uutiset/201902-varmista-virtaussimuloinnilla-asuntojen-jaeteilman-seinaepuhalluksen-maeaeraeystenmukaisuus-ja-toimivuus/> [viitattu 14.11.2022].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Esimerkki 30-kerroksisen rakennuksen korkeudesta metreinä ja vesipatsaan staattinen paine baareina, johon on lisätty ylimmän kerroksen 2 baarin käyttöpaine.

Kuva 2. Vyöhykekohtaisilla pystyrungoilla toteutettu lämmitysjärjestelmä (mukaillen Laasonen 2018, 23).

Kuva 3. Yhdellä korkeapainenusujohdolla toteutettu lämmitysjärjestelmä (mukaillen Laasonen 2018, 23).

Kuva 4. Vyöhykekohtaisilla välilämmönsiirtimillä toteutettu lämmitysjärjestelmä (mukaillen Laasonen 2018, 23).

Kuva 5. Reflex Variomat -paineenpitoasema. Kuvakaappaus Variomat -esitteestä. Reflex Oy.

Kuva 6. Vakuumissa vaurioitunut säiliö. Kuvakaappaus Variomat -esitteestä. Reflex Oy.

Kuva 7. Paisuntalenkin periaatepiirros. Kuvakaappaus Rakennustieto -ohjekortista LVI-10330 s.3. Paisuntalenkin periaatepiirros.

Kuva 8. Paljetasaimen periaatepiirros. Kuvakaappaus Rakennustieto -ohjekortista LVI-10330 s.4. Paisuntalenkin periaatepiirros.

Kuva 9. Välisäiliöstä imevällä paineenkorotusasemalla toteutettu käyttövesijärjestelmä. Kuvakaappaus Grundfos PDF-dokumentista. Saatavissa: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf> [viitattu 08.11.2022].

Kuva 10. Grundfos Hydro MPC-E-paineenkorotusasema. Kuvakaappaus Grundfos WWW-dokumentista. Saatavissa: <https://product-selection.grundfos.com/fi/products/hydro-mpc/hydro-mpc-e?tab=models> [viitattu 08.11.2022].

Kuva 11. Paineenalennusventtiilin leikkauskuva. Kuvakaappaus Grundfos PDF-dokumentista. Saatavissa: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf> [viitattu 08.11.2022].

Kuva 12. Vyöhykkeittäin jaettu paineenkorotus (mukaillen Laasonen 2018, 23).

Kuva 13. Vyöhykekohtainen paineenkorotus kerroksissa (mukaillen Laasonen 2018, 23).

Kuva 14. Vyöhykekohtainen paineenkorotus kerroksissa alaspäin palvelevilla jakojohdoilla. Kuvakaappaus Aquatherm WWW-dokumentista. Saatavissa: <https://aquatherm.com/tech-bulletins/aquatherm-and-high-rise-construction> [viitattu 14.11.2022]

Kuva 15. Paineenalennusasema. Kuvakaappaus Aquatherm WWW-dokumentista. Saatavissa: <https://aquatherm.com/tech-bulletins/aquatherm-and-high-rise-construction> [viitattu 14.11.2022]

Kuva 16. Rinnakkaistuuletettu viemärijärjestelmä. Kuvakaappaus Geberit Oy WWW-dokumentista. Saatavissa: https://assets.geberit.fi/local-media/pdf/supertube-brochure.pdf?_gl=1*1c6vzpp*_ga*MTA0NDI1MjQ3OC4xNjY2MjY1Nzcy*_ga_4F3FVSFHDR*MTY2ODk4MTM2OS40LjA-uMTY2ODk4MTM3MS4wLjAuMA [viitattu 15.10.2022]

Kuva 17. Nopeus putoamiskorkeuden funktiona vapaapudotukselle ja pystyviemärissä. Kuvakaappaus Geberit Sovent Planning manual PDF-dokumentista.

Kuva 18. Lining esivalmistettu pohjakulma. Kuvakaappaus Lining Oy PDF-dokumentista. Saatavissa: <https://www.lining.fi/Download/24254/Lining%20pohjakulma.pdf> [viitattu 05.09.2022]

Kuva 19. Hydraulinen hyppy. Kuvakaappaus The free WWW-dokumentista dictionary. Saatavissa: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Hydraulic+Jump> [viitattu 28.09.2022]

Kuva 20. Geberit Supertube -järjestelmän osat. Kuvakaappaus Geberit supertube WWW-dokumentista. Saatavissa: <https://www.geberit.fi/tuotteet/viemarijarjestelmat/geberit-supertube/> [viitattu 15.10.2022]

Kuva 21. Pystyviemärin paineenvapautuslinja. Kuvakaappaus Geberit Sovent Planning manual PDF-dokumentista. Geberit Oy.

Kuva 22. Kerroskohtainen ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvakaappaus PDF-dokumentista. FläktGroup Oy. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=8a24fe53-2a7f-4b51-8c5e-c9b84247ce6c> [viitattu 05.09.2022].

Kuva 23. Trox RN-D-vakiovirtaussäädin. Kuvakaappaus WWW-dokumentista. Tecnocolor Oy. Saatavissa: <https://www.tecnocolor.fi/vakiovirtauss%C3%A4%C3%A4din-rn-d-400-d2-i420rnd40> [viitattu 05.09.2022]

Kuva 24. Asuntokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvakaappaus WWW-dokumentista. Saatavissa: <https://talotekniikkainfo.fi/page/export/html/214> [viitattu 05.09.2022]

Kuva 25. Painesuhteisiin vaikuttavat tekijät. Kuvakaappaus PDF-dokumentista. Plescia, S. 2013. Saatavissa: https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-air_leakage_control_in_large_res_buildings.pdf [viitattu 02.09.2022]

Kuva 26. Hormivaikutus ja neutraali taso. Kuvakaappaus PDF-dokumentista. Plescia, S. 2013. Saatavissa:

<https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article- air leakage control in large res. buildings.pdf> [viitattu 02.09.2022]

Kuva 27. IDA-ICE-simulaatio ja hormivaikutuksen reitin hahmotelu. Kuvakaappaus PDF-dokumentista. Granlund Oy sisäinen tietokanta.

Kuva 28. Kuilujen osastoinnin periaate. Kuvakaappaus PDF-dokumentista. Ranta-aho, I. 2020. Saatavissa: https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Sisailmastoseminaari_2020_Ranta_Aho.pdf [viitattu 06.09.2022]

Kuva 29. Korkeus tuulen nopeuden funktiona erilaisissa maastoissa. Kuvakaappaus WWW-dokumentista. Sinovoltaics. Saatavissa: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/location-factor-for-wind-and-solar/> [viitattu 14.10.2022]

Kuva 30. Periaatepiirros korkean rakennuksen yhdistetystä ulospuhallus- ja ulkoilmalaitteesta keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä. Granlund Oy sisäinen tietokanta.

Kuva 31. Kuvakaappaus erään rakennuksen CFD-simulaatiosta. Granlund Oy sisäinen tietokanta.